

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 658.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-2-158-165



УЛУЧШЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Запорожцев А.В., Хазова Вер.И., Хазова Вик.И.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Особенностью процессов системы менеджмента качества (СМК) является необходимость рассматривать их с двух точек зрения: с точки зрения сущности процесса преобразования, выполняемого в данном процессе, а также с точки зрения соответствия этого процесса требованиям стандартов серии ISO 9000. В связи с этим процесс СМК можно рассматривать на разных уровнях: уровне элемента производственного потока (оборудование), уровне производственного потока, уровне управления производственным потоком и уровне сети производственных потоков. Для того чтобы цифровой двойник процесса СМК успешно решал задачи повышения эффективности процесса на каждом из упомянутых уровней за счет разработки улучшений, его цифровая модель должна содержать элементы, соответствующие уровню рассмотрения процесса. **Цель работы и методы исследования.** Разработать подход к моделированию процесса СМК, обеспечивающий создание таких моделей, в структуре которых будут элементы, соответствующие реальным процессам. Это позволит поставить в соответствие изменения в модели процесса изменениям в реальном процессе. Для решения этой задачи в работе используется подход системной динамики, что позволяет разрабатывать модели, адекватные реальному процессу как по структуре, так и по поведению. **Результаты.** Рассмотрен вопрос о разработке модели элемента производственного потока (оборудования). Разработана цифровая модель производственного потока и доказана адекватность этой модели основным закономерностям, которые действуют в производственных системах. На основе модели производственного потока построена модель управления производственным процессом. **Практическая значимость.** Предложен подход к разработке моделей производственных процессов, который устанавливает конкретные требования к имитационным моделям в зависимости от концепции улучшения процесса.

Ключевые слова: цифровой двойник процесса, имитационное моделирование, производственный процесс, процесс СМК, улучшение процесса СМК, модель улучшений процесса, моделирование производственных процессов

© Запорожцев А.В., Хазова Вер.И., Хазова Вик.И., 2025

Для цитирования

Запорожцев А.В., Хазова Вер.И., Хазова Вик.И. Улучшение производственных процессов системы менеджмента качества на основе моделирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №2. С. 158-165. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-158-165>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

MODELLING BASED IMPROVEMENT OF QMS MANUFACTURING PROCESSES

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). A feature of the quality management systems (QMS) process is the necessity to consider them from two points of view. One is the content of conversion realized in this process while the other is its compliance with ISO 9000 standards requirements. Therefore, QMS process can be studied at different levels: level of the production flow element (i.e. equipment), production flow level, level of the production flow management and level of production flows network. In order to QMS process digital twin to successfully increase process efficiency on each level by developing improvements its digital model need to comprise elements which correspond to the level of consideration. **Objective and Methods Applied.** The main objective of this paper is to develop such an approach to QMS process modelling that allows creation of models which elements correspond to the real process elements. This allows to match changes in the process model to those of the real process. System dynamics approach is being used to develop models which structure and behaviour are adequate to the real process. **Results.** The authors considered an issue of the model of production flow element (equipment) development. The production flow digital model adequate to production systems basic patterns is developed. This model became a basis for the development of the model of production flow management. **Practical Relevance.** An approach to the development of manufacturing process models is suggested that establishes specific requirements for the simulation models depending on the process improvement concept.

Keywords: process digital twin, imitation modelling, manufacturing process, QMS process, QMS process improvement, model of process improvement, manufacturing processes modelling

For citation

Zaporozhtsev A.V., Khazova Ver.I., Khazova Vik.I. Modelling Based Improvement of QMS Manufacturing Processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 158-165. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-2-158-165>

Введение

В связи с быстрыми изменениями в экономике и технологиях адаптивность и изменчивость производственных систем стали ключевыми характеристиками обрабатывающей промышленности [1]. Чтобы повысить свою конкурентоспособность, компаниям необходимо учитывать новые требования рынка и переосмысливать свой производственный процесс с помощью цифровых технологий [2]. В этом контексте с быстрым развитием информационных технологий производственные системы могут быть преобразованы в интеллектуальные [3], где может быть реализована интеграция продуктов и машин во взаимосвязанные физические и цифровые процессы. В этой связи важными являются исследования, в которых рассматривается задача моделирования, анализа и проектирования сложных производственных систем.

Одной из концепций моделирования, применяемых для изучения сложных систем, является имитационное моделирование. К настоящему времени сформировалось три ключевых подхода к разработке имитационных моделей. Первый из них ориентирован на дискретно-событийное моделирование [4], в рамках которого система моделируется совокупностью происходящих в ней событий. Это позволяет максимально точно воспроизводить в имитационной модели все особенности работы элементов моделируемой

системы. Дж. Форрестер предложил методологию моделирования производственных систем путем изучения основных потоков, циркулирующих в производстве [5].

Несмотря на значительные достижения в области использования имитационного моделирования [6], принципы разработки имитационных моделей цифровых двойников процессов СМК в полной мере не исследованы. Важным является вопрос о детальности описания производственного процесса при моделировании. Так как цифровые двойники становятся важным ресурсом производственной системы, их разработка требует определения целей создания цифровых двойников и тех возможностей, которыми они должны обладать для управления производственным процессом. В рамках данного исследования целью создания цифрового двойника процесса СМК является возможность исследования результатов улучшения процесса с помощью его цифровой модели. Для этого цифровая модель процесса должна обладать следующими возможностями:

- соответствовать реальному производственному процессу по структуре и поведению;
- обладать модифицируемостью – возможностью изменять структуру цифровой модели с тем, чтобы она соответствовала структуре измененного производственного процесса.

Материалы и методы исследования

Проблемы реализации принципа постоянного улучшения на основе имитационного моделирования. Инструментом разработки улучшений является цикл PDSA [7], в котором реализуется научный подход к улучшениям. Суть научного подхода в том, что на основе имеющихся знаний о процессе выдвигается гипотеза (предложение по улучшению), которая должна быть проверена объективным методом, а результаты проверки – сопоставлены с выдвинутой гипотезой. Такое сравнение или подтверждает, что предложение по улучшению действительно улучшает показатели процесса, или показывает отсутствие влияния предложения по улучшению на них. Инструментом проверки предложения по улучшению является имитационная модель, которая должна соответствовать следующему принципу: модель процесса, используемая для улучшения, должна содержать элементы, соответствующие элементам реального процесса. То есть любое предложение по улучшению процесса должно формулироваться как изменение одного из элементов реального процесса: характеристик оборудования, правил выполнения операций, принципов управления процессом и т.д.

Объективному описанию реального процесса в наибольшей степени соответствует его функциональная модель в стандарте IDEF0 [8] (рис. 1). В модели процесса присутствуют те объекты, которые есть в реальном процессе, а функции описывают преобразования, которые производятся с этими объектами. Важным элементом функциональной модели являются правила преобразования объектов. Хотя функциональная модель процесса является концептуальной моделью, в которой дается описание принципа работы процесса, она является основой для построения математической модели процесса, так как определяет структуру моделируемого процесса. Для этого математическая модель процесса должна включать математические параметры объектов процесса и математические функции преобразования этих объектов.

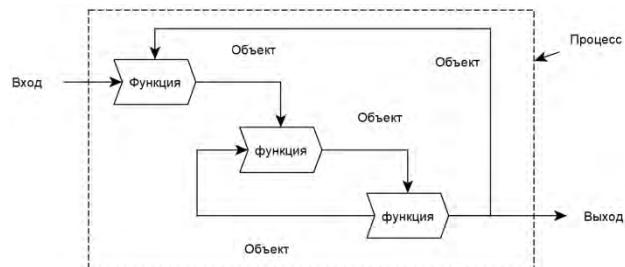


Рис. 1. Функциональная модель процесса
Fig. 1. A functional model of a process

В заключение рассмотрения проблем разработки имитационных моделей для проверки улучшений процессов выдвинута следующая гипотеза: для каждого улучшения необходима индивидуальная цифровая модель. Действительно, так как каждая модель

разрабатывается с определенной целью (улучшения в определенном аспекте производственной системы), то для каждого улучшения необходима индивидуальная модель, которая содержит изменения, представляющие суть улучшения процесса.

Модель факторов улучшения процесса. Реальный производственный процесс – это конкретная структура производственного потока, реальные характеристики рабочих станций, принципы управления их совместной работой, использование пакетной обработки объектов, наличие буферов времени, мощности и запасов, их расположение в структуре производственного потока и т.д. Показатели реального производственного процесса всегда ниже теоретических. Основной причиной этого является вариабельность, присущая любому реальному процессу. Исключить действие вариабельности полностью в реальном процессе невозможно, однако возможными направлениями улучшения показателей процессов являются решения, направленные на снижение отрицательного воздействия вариабельности.

Кроме вариабельности на показатели производственного процесса действуют и другие факторы. В статье [9] выделены четыре аспекта, которые рекомендуется учитывать при разработке улучшений производственного процесса. Этими аспектами являются: процесс, поток, сеть процессов, организация производства (рис. 2).

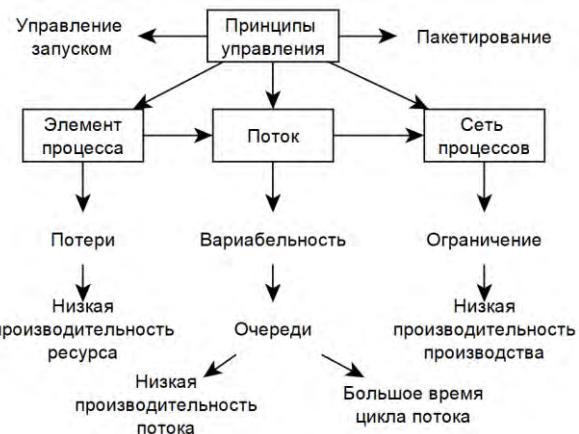


Рис. 2. Аспекты улучшения производственного процесса
Fig. 2. Manufacturing process improvement aspects

Кроме перечисленных аспектов существенное влияние оказывают принципы управления производственным процессом [10].

На основе данной модели можно построить таксономию направлений улучшений. Основу такой таксономии образуют следующие объекты улучшений:

- элемент производственного потока;
- производственный поток;
- сеть производственных потоков;
- принципы управления элементами производственной системы.

В данной работе ограничимся рассмотрением задач улучшений для следующих объектов улучшений:

- элемент производственного потока (оборудование);
- производственный поток;
- принципы управления производственными потоками.

Рассмотрение задач улучшений сети производственных потоков и более детальное изучение принципов управления производственными системами требует предварительного рассмотрения сформулированных выше задач.

Модель улучшений работы элемента производственного потока (оборудования). Базовым элементом производственного потока является производственная ячейка, основным элементом которой является производственное оборудование. Работу производственного оборудования принято оценивать показателем «Индекс общей эффективности использования оборудования» (Overall Equipment Effectiveness, OEE) [11]:

$$\text{OEE-индекс} = \text{Эксплуатационная готовность} \times \\ \times \text{Эффективность} \times \text{Коэффициент качества.}$$

Эксплуатационная готовность (доступность) – это соотношение, характеризующее связь фактического времени производства с плановым временем занятости персонала для рабочей операции. На показатель доступности влияют поломки оборудования, время на переналадку и регулировку, регистрируемые мелкие остановки.

Эффективность отражает, насколько фактическая работа оборудования близка к номинальной производительности. На эффективность влияют краткосрочные (нерегистрируемые) остановки, замедление скорости работы оборудования.

Коэффициент качества определяется общим количеством продукции установленного качества по сравнению с общим выпуском продукции.

Для повышения показателя ОЕЕ необходимо улучшать все три составляющие этого показателя. Рассматривая системное окружение процесса оценки состояния оборудования (**рис. 3**), можно выделить следующие процессы, влияющие на показатель ОЕЕ:

– диспетчерское управление предоставляет данные о внеплановых простоях оборудования по причинам отсутствия необходимых ресурсов – материалов, инструмента, рабочих заданий;

– система технического обслуживания и ремонта (ТОиР) предоставляет данные о простоях оборудования при возникновении отказов;

– организация технологического процесса предоставляет данные о потерях рабочего времени при выполнении технологического процесса, снижающих пропускную способность оборудования;

– контроль качества предоставляет данные о количестве дефектных изделий, обнаруженных при контроле качества продукции.

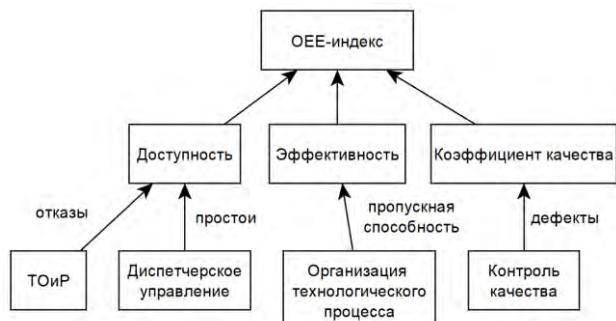


Рис. 3. Процессы, определяющие показатели работы производственного оборудования

Fig. 3. Processes defining the performance indicators of production equipment

Таким образом, для расчета показателя ОЕЕ необходимо собрать данные (простоя, отказы, пропускная способность, дефекты) из нескольких процессов. То есть задача определения показателя ОЕЕ является примером кросс-функционального процесса – процесса, отдельные операции которого выполняются в нескольких процессах. Возможно ли построить такую имитационную модель, на которой можно проводить изучение действия изменений, улучшающих работу оборудования по показателю ОЕЕ? Ввиду того, что оценка работы оборудования зависит от нескольких процессов, ставить такую задачу можно только после создания моделей изолированных процессов оперативного управления производством, ТОиР, управления качеством и организации технологического процесса.

Модель для улучшения производственного потока. Модель производственного потока представляет собой последовательное соединение производственных ячеек, в каждой из которых происходит обработка объектов труда (**рис. 4**).

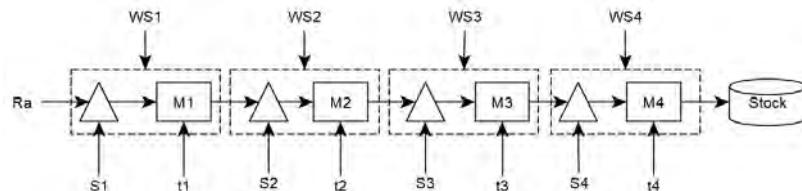


Рис. 4. Модель производственного процесса как потока
Fig. 4. A model of the manufacturing process as a flow

В модель производственного потока входят следующие элементы:

- входной поток заявок Ra (ед./ед. времени);
- рабочая станция WS – базовый элемент производственного потока;
- обслуживающее устройство M -элемент, в котором происходит преобразование объекта потока. Основными показателями обслуживающего устройства являются время обслуживания t и пропускная способность $r = 1/t$ (ед./ед. времени);
- очередь объектов на обслуживание S -элемент, в котором хранятся объекты перед обработкой на обслуживающем устройстве;
- запас объектов, прошедших полный цикл обработки Stock.

Данная модель отображает физические процессы, происходящие в производственном потоке. Основными закономерностями производственного потока являются [10]:

- формула Кингмана

$$WT = V \cdot U \cdot T, \quad (1)$$

где WT – время ожидания;

V – фактор вариабельности;

U – фактор использования ресурса;

T – среднее операционное время обработки на рабочей станции;

- закон Литтла

$$CT = WIP/TH, \quad (2)$$

где TH – производительность потока (ед./ед. времени);
 WIP (НЗП) – количество объектов в процессе, ед.;
 CT – время цикла – время, необходимое объекту, чтобы пройти через весь поток.

Применим для построения модели производственного потока метод моделирования системной динамики [12]. В качестве примера используем модель, которая рассматривается в работе [10] (рис. 5).

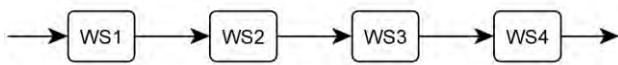


Рис. 5. Теоретическая модель производственного потока

Fig. 5. A theoretical model of the manufacturing process

Соответствующая расчетная модель производственного потока, выполненная в программе iThink, показана на рис. 6.

Каждый элемент производственного потока представлен на рис. 6 совокупностью следующих элементов: очередью объектов на обслуживание (запасами) Sti , обслуживающими устройствами (станками) Mi , входными Ii и выходными Oi потоками. Запасы Sti моделируются блоком «Резервуар» (Reservoir), станки Mi – блоком «Конвейер» (Conveyor), а входные и выходные потоки – блоком «Поток» (Flow). Блоки-конвертеры WIP , TH , CT используются для расчета показателей незавершенного производства, производительности потока и времени цикла соответственно.

Математическая модель поведения производственного потока описывается системой дифференциальных уравнений, включающей четыре ($i = 1, \dots, 4$) разностных уравнения для запасов и четыре ($i = 1, \dots, 4$) разностных уравнений для станков:

$$St_{i,t} = St_{i,t-dt} + (O_{i-1} - I_i)dt; \quad (3)$$

$$M_{i,t} = M_{i,t-dt} + (I_i - O_i)dt. \quad (4)$$

Проведем проверку адекватности предлагаемой модели потоков и запасов путем сравнения результатов ее испытаний с данными теоретической модели [10] в условиях отсутствия вариабельности времени обслуживания.

Каждая из четырех рабочих станций (см. рис. 5) выполняет работу за 2 ч и сразу (без задержки) передает работу на следующий станок. Так как время обслуживания у всех рабочих станций одинаковое, то все станки имеют пропускную способность $r = 1/t = 0,5$ ед./ч.

Тогда чистое операционное время производственного потока равно сумме времени обслуживания всех рабочих станций $T_0 = 8$ ч, а поскольку вариабельность времени обслуживания отсутствует, то есть поток сбалансирован, $CT = T_0$. Расчет уровня НЗП в процессе осуществляется по закону Литтла.

В модели потоков и запасов для осуществления тех же расчетов приняты следующие начальные значения параметров:

$$St1 = St2 = St3 = St4 = 0;$$

$$M1 = M2 = M3 = M4 = 1;$$

$$I1 = I2 = I3 = I4 = O1 = O2 = O3 = O4 = 0,5.$$

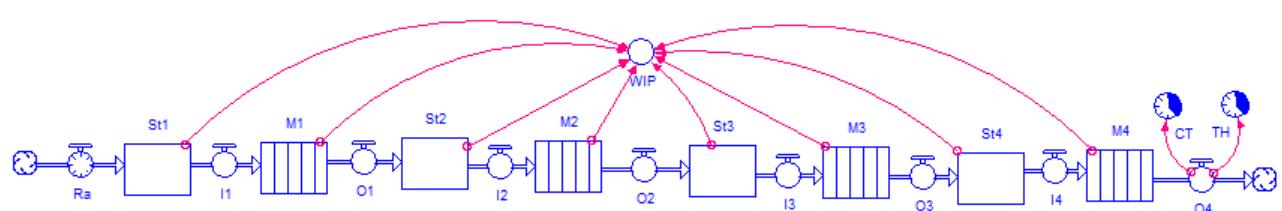


Рис. 6. Модель производственного потока в виде потоков и запасов

Fig. 6. Stock and flow model of the manufacturing process

Производительность потока TH определяется с помощью встроенной функции $\text{THROUGHPUT}(O4)$, время цикла CT – функцией $\text{CYCLETIME}(O4)$. Объем незавершенного производства WIP представляет собой сумму объектов в обработке, а также находящихся в запасе:

$$WIP = \sum_i (Sti + Mi). \quad (5)$$

Данные теоретических расчетов и результаты испытаний модели приведены в **таблице**.

Таблица. Сравнение данных моделирования с теоретическими значениями

Table. Comparison of simulation data with theoretical values

R_a	Теоретический расчет			Результаты испытаний модели		
	TH	CT	WIP	TH	CT	WIP
0,125	0,125	8	1	0,125	8	1
0,250	0,250	8	2	0,250	8	2
0,375	0,375	8	3	0,375	8	3
0,50	0,50	8	4	0,50	8	4

Таким образом, предлагаемая модель производственного потока адекватно описывает его поведение и может служить основой для разработки улучшений производственного процесса СМК, так как содержит объекты этого потока с определенными характеристиками.

Модель для улучшения управления производственными потоками. Важным аспектом повышения эффективности производства является выработка правил управления производством. Для возможности исследовать разные правила управления нужно в модель производственного потока ввести элементы управления и разработать правила управления.

Основным элементом операционного управления производственным процессом является управляющий блок запуска деталей в производство (рис. 7). Управление производственным процессом обеспечивается информационными потоками, которые на рис. 7 показаны пунктирными линиями.

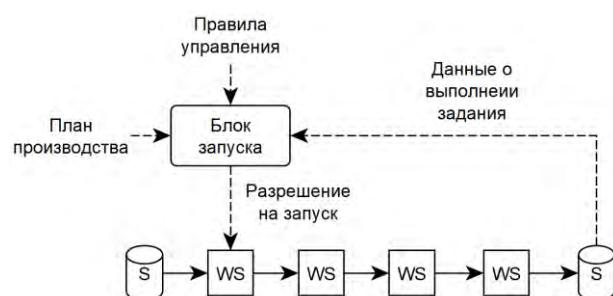


Рис. 7. Модель оперативного управления производственным процессом СМК
Fig. 7. The operational management model of QMS manufacturing process

План производства устанавливает последовательность заданий, которые должны быть выполнены в

производственном процессе. Правила управления определяют условия, при которых произойдет запуск заданий в производство – будет дано разрешение на выполнение производственного задания. Согласно принципам эффективного управления производственными процессами [10], запуск в производство нового задания производится только после выхода задания из производственного процесса, что обеспечивает поддержание в производственном процессе оптимального уровня НЗП.

Проведем моделирование поведения обобщенной модели в условиях вариабельности времени работы оборудования. Примем, что время обработки заданий рабочей ячейкой задано формулой

$$R_b = T_0 + T_{\text{доп}}, \quad (6)$$

где R_b – выходной поток заданий; $T_{\text{доп}}$ – дополнительное время обработки, связанное с вариабельностью готовности оборудования.

Результаты моделирования представлены на рис. 8.

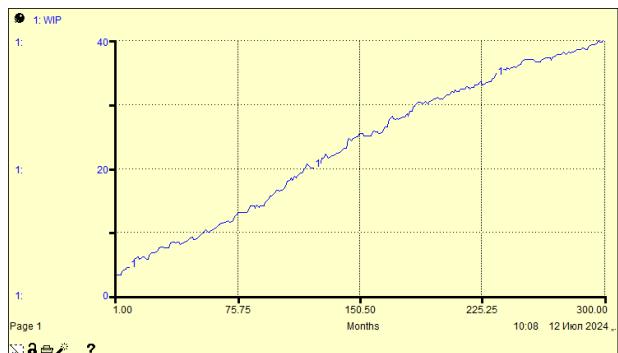


Рис. 8. Поведение производственного процесса без управления
Fig. 8. Behaviour of a manufacturing process without management

Если в производственном потоке действует вариабельность пропускной способности оборудования, то при определенных значениях интенсивности входного потока R_a стабильного состояния не наблюдается и WIP будет неуклонно возрастать. Для стабилизации работы производственного потока необходимо в обобщенную модель производственного потока ввести простейший контур управления (рис. 9).

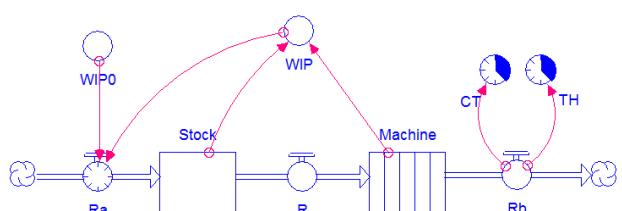


Рис. 9. Модель производственного потока с простейшим контуром управления
Fig. 9. General model of a manufacturing process with simplest control loop

Управление потоком построено на поддержании оптимального уровня незавершенного производства *WIP* [10]. Рассмотрим правило управления производственным потоком, в котором при превышении уровня НЗП в 25 единиц [13] интенсивность входного потока R_a ограничивается значением 0,1. Если *WIP* ниже указанного уровня, то интенсивность входного потока R_a восстанавливается до максимального уровня, равного 0,5.

В зависимости от текущего значения *WIP* входной поток принимает два значения: минимальное значение 0,1 или максимальное значение 0,5. В результате управления производственным потоком поведение производственного потока стабилизируется (рис. 10).

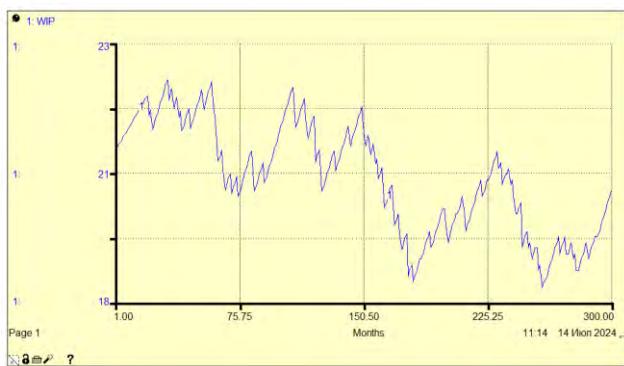


Рис. 10. Поведение производственного процесса с использованием простейшего контура управления

Fig. 10. Behaviour of a manufacturing process with simplest control loop

Данная модель содержит в явном виде закон управления, что позволяет изучать поведение производственного потока при разных параметрах закона управления.

Заключение

В результате проведенного исследования было сформулировано несколько принципов, обеспечивающих разработку таких цифровых моделей, которые можно использовать в качестве инструмента улучшения процессов. Наиболее важными положениями являются следующие:

1. Модель процесса, которая используется для улучшения, должна содержать элементы, соответствующие элементам реального процесса.

2. Для каждого цикла улучшений процесса нужна индивидуальная модель, содержащая изменения, предлагаемые к внедрению в реальный процесс.

3. Цифровая модель процесса, используемая для улучшения, должна соответствовать уровню рассмотрения процесса. Основными уровнями рассмотрения процесса с целью его улучшения являются: элемент производственного потока (оборудование), производственный поток, управление производственным по-

током, сеть производственных потоков, управление производственными процессами.

5. Разработка улучшений для элемента производственного процесса (оборудования) требует создания совокупности моделей системного окружения работы этого элемента.

6. Показана возможность адекватного описания производственных потоков на основе моделей системной динамики.

7. Рассмотрен вариант управления производственным потоком и его реализация в цифровой модели.

Список источников

1. Towards adaptable manufacturing systems / N. Keddis, G. Kainz, C. Buckl, A. Knoll // 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Cape Town, South Africa, 2013, pp. 1410-1415. DOI: 10.1109/ICIT.2013.6505878
2. Florescu A., Barabas S. Modeling and Simulation of a Flexible Manufacturing System – A Basic Component of Industry 4.0. // Applied Sciences. 2020, no. 10, Article 8300. DOI: 10.3390/app10228300
3. Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges / Chen B., Wan J., Shu L., Li P., Mukherjee M., & Yin B. // IEEE Access. 2018, no. 6, pp. 6505-6519. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2783682
4. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. 847 с.
5. Форрестер Дж. Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика). М.: Прогресс, 1971. 340 с.
6. Al-Ahmari A.M., & Ridgway K. An integrated modelling method to support manufacturing systems analysis and design // Computers in Industry. 1999, no. 38, pp. 225-238. DOI: 10.1016/S0166-3615(98)00094-3
7. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2018. 53 с.
8. Марка Дэвид А., МакГоэн Клемент. Методология структурного анализа и проектирования SADT. М.: Мета-Технология, 1993. 240 с.
9. Hopp W.J., & Spearman M. The lenses of lean: Visioning the science and practice of efficiency // Journal of Operations Management. 2020, no. 67, pp. 610-626. DOI: 10.1002/joom.1115
10. Hopp W.J., Spearman M.L. Factory Physics: foundations of Manufacturing Management. New York: Irwin/McGraw-Hill, 2001. 720 р.
11. ГОСТ Р ИСО 22400-2-2019. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Ключевые технико-экономические показатели (KPIs) для управления производственными операциями. Ч. 2. Определения и описание. М.: Стандартинформ, 2019. 66 с.
12. Richmond Barry. An Introduction to System Thinking with STELLA. ISEE Systems, inc., 2004. 165 р.
13. Pound E. S., Bell J.H., Spearman M.L. Factory Physics for Managers: How Leaders Improve Performance in a Post-Lean Six Sigma World. New York.: McGraw-Hill Education, 2014. 384 р.

References

1. Keddis N., Kainz G., Buckl C., Knoll A. Towards adaptable manufacturing systems. 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Cape Town, South Africa. 2013, pp. 1410-1415. DOI: 10.1109/ICIT.2013.6505878
2. Florescu, A. and Barabas, S. Modeling and Simulation of a Flexible Manufacturing System – A Basic Component of Industry 4.0. Applied Sciences. 2020;10:Article 8300. DOI: 10.3390/app10228300
3. Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. IEEE Access. 2018;(6):6505-6519. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2783682
4. Kelton W. David, Law Averill M. *Imitatsionnoe modelirovaniye* [Simulation Modeling]. Saint-Petersburg: Kyiv: Publishing Group BHV, 2004, 847 p. (In Russ.)
5. Forrester J.W. *Osnovy kibernetiki predpriyatiya (Industrial'naya dinamika)* [Foundations of enterprise cybernetics (Industrial dynamics)]. Moscow: Publishing House Progress, 1971, 340 p. (In Russ.)
6. Al-Ahmari, A.M., & Ridgway, K. An integrated modelling method to support manufacturing systems analysis and design. Computers in Industry. 1999;(38):225-238. DOI: 10.1016/S0166-3615(98)00094-3
7. State Standard GOST R ISO 9000-2015. Quality Management Systems. Fundamentals and vocabulary. Moscow: Standardinform, 2018, 53 p. (In Russ.)
8. Marca David A., McGowan Clement L. *Metodologiya strukturnogo analiza i proektirovaniya SADT* [Structured Analysis and Design Technique SADT]. Moscow: MetaTechnology, 1993, 240 p. (In Russ.)
9. Hopp, W.J., & Spearman, M. The lenses of lean: Visioning the science and practice of efficiency. Journal of Operations Management. 2020;(67):610-626. DOI:10.1002/joom.1115
10. Hopp W.J., Spearman M.L. Factory Physics: foundations of Manufacturing Management. New York: Irwin/McGraw-Hill, 2001, 720 p.
11. State Standard GOST R ISO 22400-2-2019. Automation systems and integration – Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management. Part 2: Definitions and descriptions. Moscow: Standardinform, 2019, 66 p. (In Russ.)
12. Richmond Barry. An Introduction to System Thinking with STELLA. ISEE Systems, inc., 2004, 165 p.
13. Pound E. S., Bell J.H., Spearman M.L. Factory Physics for Managers: How Leaders Improve Performance in a Post-Lean Six Sigma World. New York: McGraw-Hill Education, 2014, 384 p.

Поступила 20.08.2024; принята к публикации 02.09.2024; опубликована 30.06.2025
Submitted 20/08/2024; revised 02/09/2024; published 30/06/2025

Запорожцев Александр Валерьевич – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: wing10@yandex.ru. ORCID 0009-0001-9768-1433

Хазова Вероника Ивановна – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: viverha@gmail.com. ORCID 0009-0000-6069-9966

Хазова Виктория Ивановна – кандидат технических наук, доцент,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия.
Email: diplomla@mail.ru. ORCID 0009-0003-2338-1635

Aleksandr V. Zaporozhtsev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: wing10@yandex.ru. ORCID 0009-0001-9768-1433

Veronika I. Khazova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: viverha@gmail.com. ORCID 0009-0000-6069-9966

Viktoriya I. Khazova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.
Email: diplomla@mail.ru. ORCID 0009-0003-2338-1635