
ЭКОНОМИКА

**Совершенствование управления
бизнес-процессами цеха сахарного завода
на основе технологии цифровых двойников**

**Елена Викторовна Худякова[✉], Марина Николаевна Степанцевич,
Константин Сергеевич Музалёв**

Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия

[✉] **Автор, ответственный за переписку:** evhudyakova@rgau-msha.ru

Аннотация

Для совершенствования управления бизнес-процессами на производстве в последнее время все чаще применяется технология цифровых двойников. Методология применения цифровых двойников первого уровня (имитационная модель процесса) апробирована нами на примере приемочного цеха сахарного комбината, где производится первичная обработка сахарной свеклы и подготовка ее к дальнейшей переработке. Цифровые двойники позволяют предприятиям проводить виртуальное моделирование и тестирование новых производственных концепций, оптимизировать процессы, предсказывать отказы оборудования, проводить диагностику производственных процессов с помощью виртуальных копий, а также совершенствовать методы управления. Создание цифрового двойника процесса приемки свеклы позволило определить качественные характеристики процесса. Поскольку процесс – линейный, пропускная способность цеха определяется равномерным распределением нагрузки по всему контуру. «Узкое место» в системе определяется операцией, занимающей больше времени по отношению к предыдущей и последующей, что будет создавать очередь из транзактов. Анализ прогона модели показал «узкие места» в сети: увеличение очередей из автомобилей на операцию приемки свеклы, на взвешивание БРУТТО и в пропускном пункте на завод. Для решения данной проблемы проведена оптимизация параметров системы, целью которой является выравнивание нагрузки на узлы цеха приемки свеклы, сокращение очередей к обслуживающим устройствам (узлам системы). Проведенный оптимизационный эксперимент показал, что для этого необходимо увеличить количество контрольных проверок свекломассы до трех, скорость загрузки грузовой машины должна составлять 6 мин. В итоге обобщенная (усредненная) функция нагрузки на цех сократилась почти в 2 раза.

Ключевые слова

Управление бизнес-процессами, цифровые двойники, имитационное моделирование, оптимизация бизнес-процессов, управление производством сахара

Для цитирования

Худякова Е.В., Степанцевич М.Н., Музалёв К.С. Совершенствование управления производством сахара на основе технологии цифровых двойников // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2025. № 5. С. 240–253.

Improving business process management in a sugar factory workshop based on digital twin technology

Elena V. Khudyakova[✉], Marina N. Stepantsevich, Konstantin S. Muzalev

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

[✉]**Corresponding author:** evhudyakova@rgau-msha.ru

Abstract

Digital twin technology has been increasingly applied to improve business process management in manufacturing. A first-level digital twin methodology (process simulation model) was tested using the example of a sugar factory acceptance workshop, where the initial processing of sugar beets and their preparation for further processing occur. Digital twins enable enterprises to conduct virtual modeling and testing of new production concepts, optimize processes, predict equipment failures, diagnose production processes using virtual replicas, and improve management methods. The creation of a digital twin for the sugar beet acceptance process allowed for the determination of the process qualitative characteristics. As the process is linear, the throughput of the workshop is determined by the uniform distribution of workload across the entire circuit. A “bottleneck” in the system is defined by an operation that takes more time relative to the preceding and subsequent operations, which creates a queue of transactions. Analysis of the model run revealed “bottlenecks” in the network, specifically, increased queues of trucks at the sugar beet acceptance operation, at the gross weight weighing station, and at the factory entry checkpoint. To address this problem, the system parameters were optimized, with the aim of balancing the load on the nodes of the sugar beet acceptance workshop and reducing queues at the servicing devices (system nodes). The optimization experiment indicated that it is necessary to increase the number of control checks of the beet mass to three and that the loading speed of a truck should be six minutes. As a result, the generalized (averaged) load function on the workshop was reduced by almost a factor of two.

Keywords

Business process management, digital twins, simulation modeling, business process optimization, sugar production management

For citation

Khudyakova E.V., Stepantsevich M.N., Muzalev K.S. Improving business process management in a sugar factory workshop based on digital twin technology. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2025. No. 5. P. 240–253.

Введение Introduction

В современном мире производство сахара является одной из ключевых отраслей агропромышленного комплекса, играющей важную роль в экономике многих стран. Так же, как и в других отраслях агропромышленного комплекса, в данной отрасли постепенно осуществляется процесс цифровой трансформации [1–3]. Современные системы поддержки принятия решений по управлению бизнес-процессами при производстве сахара включают в себя, в том числе, и технологии цифровых двойников. Цифровой двойник – это виртуальная модель объекта или системы, которая точно отражает его физические характеристики, параметры и состояние и непрерывно

синхронизируется с данными в реальном времени [4]. Разработка цифрового двойника цеха сахарного завода направлена на повышение эффективности производства, оптимизацию бизнес-процессов, снижение затрат.

Концепция цифрового двойника производства начала развиваться с 2011 г. Она основывается на использовании киберфизических систем (CPS), включающих в себя автоматизированные машины и обрабатывающие центры, подключенные к Интернету [5]. Киберфизические системы автономно изменяют производственные параметры, что делает производство более гибким и эффективным. Применение цифровых двойников в производстве сахара позволяет осуществлять мониторинг и управление производственными процессами в реальном времени, а также проводить анализ данных для принятия обоснованных управленческих решений.

Цель исследований: совершенствование управления бизнес-процессами на основе разработки цифрового двойника приемочного цеха сахарного завода и определение с его помощью оптимальных параметров бизнес-процесса в цехе.

Методика исследований

Research method

Для разработки цифрового двойника бизнес-процесса был использован метод имитационного моделирования, который позволяет отобразить структуру и логику системы. Все процессы в цехе отображаются в их логической последовательности и взаимосвязи. Динамика в модели реализуется с помощью встроенного в программу «двигателя» – системы продвижения модельного времени, когда система дискретно переходит из одного состояния в другое. В настоящее время существует множество платформ и систем для разработки цифровых двойников [6]. Данный метод реализован в системе имитационного моделирования AnyLogic, которая наряду с множеством встроенных процедур и функций имеет такой модуль, как оптимизационный эксперимент, который позволяет, используя цифровой двойник бизнес-процесса, определить и оптимизировать параметры системы (процесса) [7].

Результаты и их обсуждение

Results and discussion

Для совершенствования управлением субъектами агропромышленного комплекса сегодня используются системы поддержки принятия решений, к одному из методов которых относится метод имитационного моделирования как основа технологии цифровых двойников. Современные информационные технологии позволяют создавать цифровые двойники физических объектов, бизнес-процессов, систем. Цифровой аналог бизнес-процесса может быть использован для мониторинга, анализа, оптимизации и управления производственными процессами. Цифровые двойники позволяют предприятиям выполнять виртуальное моделирование и проводить тестирование новых производственных концепций, оптимизировать процессы, предсказывать отказы оборудования, осуществлять диагностику производственных процессов с помощью виртуальных копий, а также совершенствовать методы управления.

Использование цифровых двойников в рамках концепции «Индустрия 4.0» помогает предприятиям повысить эффективность производства, сократить издержки на обслуживание и ремонт оборудования, улучшить качество продукции и обеспечить гибкость производственных процессов. Концепция «Индустрия 4.0» предполагает возможность мониторинга производственных процессов в режиме реального времени,

что повышает эффективность и точность принятия решений. Аналитика данных позволяет выявлять проблемы, связанные с функционированием производственных процессов, находить «узкие места» в сети.

Среди основных преимуществ разработки и использования цифровых двойников производства можно выделить следующие [8]:

- повышение эффективности производственных процессов путем оптимизации использования ресурсов и материалов;
- сокращение времени на запуск и наладку оборудования, а также минимизация времени простоя производственных линий;
- расширение возможностей сотрудничества между производственными компаниями и укрепление связей в цепочке поставок;
- увеличение гибкости производства, что позволяет изменять производственные процессы в зависимости от изменения спроса на продукцию;
- снижение затрат на производство за счет автоматизации и оптимизации всех стадий жизненного цикла продукции.

Более широкому внедрению цифровых двойников препятствуют такие факторы, как отсутствие специалистов, проблемы финансирования и изменения корпоративной культуры предприятий, а также риски в области кибербезопасности, поскольку устройства интернета вещей (IoT), подключенные к сети, могут быть уязвимыми для кибератак [9]. Одним из факторов, сдерживающих применение цифровых двойников, является недостаток соответствующих кадров [10].

Развитие методологии искусственного интеллекта придало импульс развитию теории и практики цифровых двойников. Искусственный интеллект может применяться тогда, когда невозможно для моделирования процесса/системы применить известные численные методы [11].

Основой цифрового двойника является имитационная модель процесса/системы. Следует согласиться с некоторыми авторами [12, 13] в том, что в условиях «Индустрии 4.0», с развитием сквозных цифровых технологий в экономике – таких, как киберфизические системы, интернет вещей, искусственный интеллект, облачные вычисления и большие данные, которые в совокупности способствуют разработке интеллектуальных, взаимосвязанных и высокоавтоматизированных производственных сред, разработка имитационных моделей сегодня должна осуществляться автоматически на основе мониторинга датчиков и состояний исполнительных механизмов, контролируемых программируемыми логическими контроллерами во время обычных операций. Это в определенной мере устраняет необходимость в предварительном знании системы, физическом осмотре или модификации существующей логики управления, тем самым сокращая участие человека и оптимизируя процесс разработки модели. Эти технологии предназначены для повышения гибкости системы, операционной эффективности и устойчивости. Фундаментальным компонентом этих технологий является цифровой двойник. Автоматизация этого процесса особенно актуальна в областях интеллектуального производства и приложений DT, где решающее значение имеет возможность быстро генерировать и адаптировать модели в ответ на данные в реальном времени [14].

Производство сахара может эффективно управляться с помощью цифровых двойников [15], представляющих собой виртуальные модели реальных объектов или процессов, которые отображает их состояние, динамику и поведение в реальном времени. Это дает следующие преимущества [16]:

1. Непрерывное отслеживание параметров производственного процесса (температура, давление, расход сырья и др.), что позволяет оперативно выявлять отклонения от нормы и проводить диагностику оборудования.

Методология применения цифровых двойников первого уровня (имитационная модель процесса) апробирована нами на примере приемочного цеха Ольховатского сахарного комбината, где производится первичная обработка сахарной свеклы и осуществляется подготовка ее к дальнейшей переработке. Процесс организован следующим образом. КАМАЗ с прицепом объемом 47 м³, грузоподъемностью 30 т в течение 6–7 мин производит загрузку свеклы на поле. Он транспортирует свеклу к цеху, на въезде в который в течение 2 мин оформляется продукция. Для контроля веса груза используются отдельные весы Брутто и Тара, время взвешивания на которых занимает 17,5±2,5 сек. Каждая пятая машина с контура подвергается отбору пробы на РЮПРО, что обеспечивает контроль за качеством сырья. Дополнительно проводится проверка загрязненности груза, которая включает в себя взвешивание, мойку, доочистку, взвешивание чистого сырья и анализ на загрязненность. После этого автомобиль с нового контура направляется на выгрузку на бетонную площадку. В зависимости от результатов анализа решается направление дальнейшего использования последующих машин с этого контура, которые могут отправляться на площадку, в закладку на хранение или непосредственно в бурачную на переработку.

Схема бизнес-процесса AS IS представлена на рисунке 2.

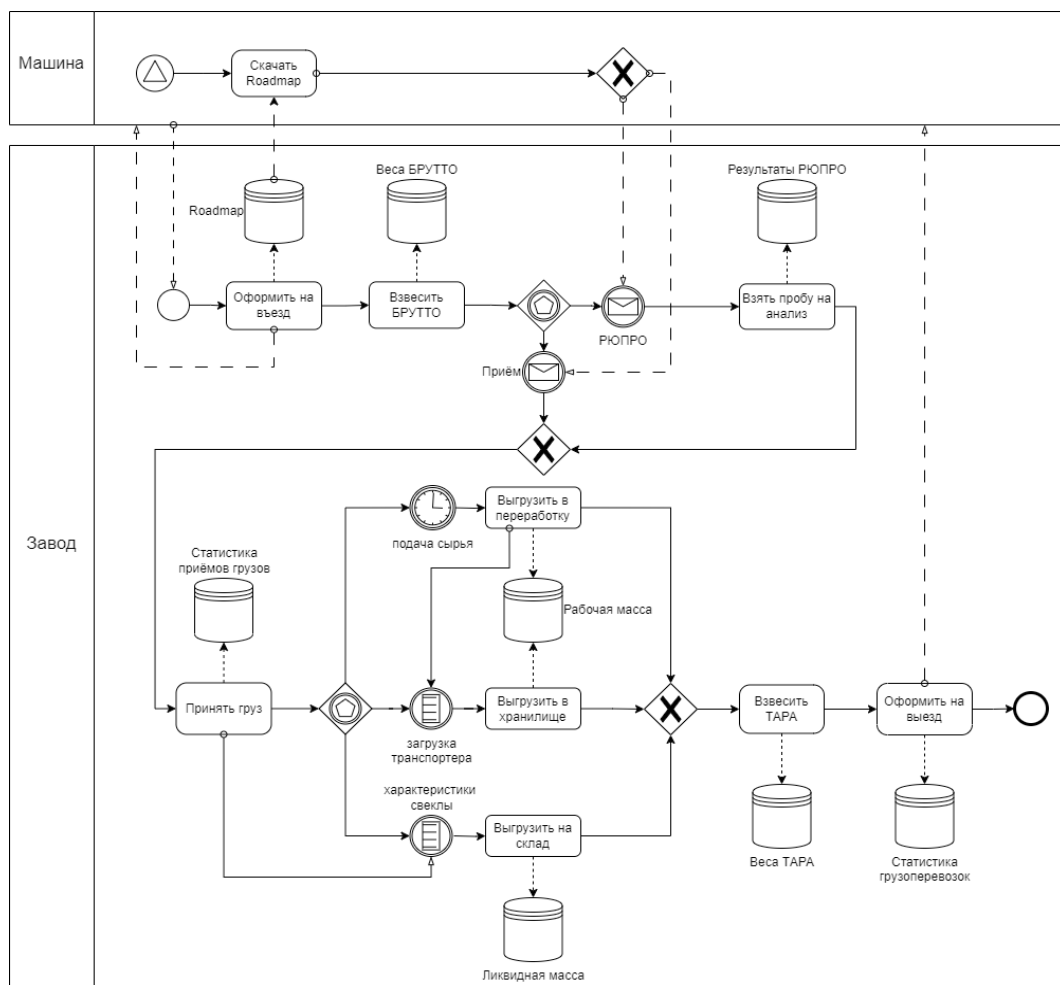


Рис. 2. Схема бизнес-процесса приемки свеклы в состоянии AS IS

Figure 2. AS-IS business process diagram for sugar beet acceptance

Затем машина отправляется на финальный этап приемки свеклы, состоящий из множества внутренних операций. Каждый автомобиль перед этим посещает пункт забора пробы РЮПРО (из каждых 5 автомобилей 4 направляются на финальную проверку, 1 автомобиль – на забор пробы. После прохождения данного этапа машина направляется на один из трех пунктов выгрузки: на склад, во временное хранилище, переработку.

Создание цифрового двойника процесса приемки свеклы позволило определить качественные характеристики процесса. Во-первых, поскольку процесс линейный, пропускная способность определяется равномерным распределением нагрузки по всему контуру. Во-вторых, «узкое место» в системе будет определяться операцией, занимающей больше времени по отношению к предыдущей и последующей, что будет создавать очередь из транзактов.

Анализ прогона модели показал увеличение очередей из автомобилей на операцию приемки свеклы, на взвешивание БРУТТО и в пропускном пункте на завод (рис. 3).

Для решения данной проблемы проведена оптимизация параметров системы, целью которой является выравнивание нагрузки на узлы системы приемки свеклы, сокращение очередей к устройствам «Въезд», «Взвешивание БРУТТО», «Контрольные проверки» и подбор величины показателя «Скорость загрузки свеклы в кузов машины».

Варьируемым параметром установлено число обслуживающих операционных точек в каждом блоке. Для повышения точности подбора параметров, производимых оптимизационным алгоритмом, был введен градиент вычислений, на который данный алгоритм должен ориентироваться. Нами выбрана такая парадигма вычислений, как гиперболическая зависимость для всех блоков, образующих «узкое место» в системе, а именно для операций въезда, взвешивания БРУТТО, приемки груза, а также выгрузки свеклы на переработку. В качестве связи данных компонентов выбрана дизъюнкция, поскольку они независимы друг от друга. Операции выгрузки в хранилище и на склад являются разгрузочными магистралями, то есть второстепенными участками, которые задействуются в случае загрузки основного – выгрузки на переработку. Вследствие небольшого количества переменных на каждую из них накладывается гиперболическая зависимость первой степени.

Параметры оптимизационного эксперимента представлены на рисунке 4.

Результаты первого оптимизационного эксперимента с текущей нагрузкой представлены на рисунке 5.

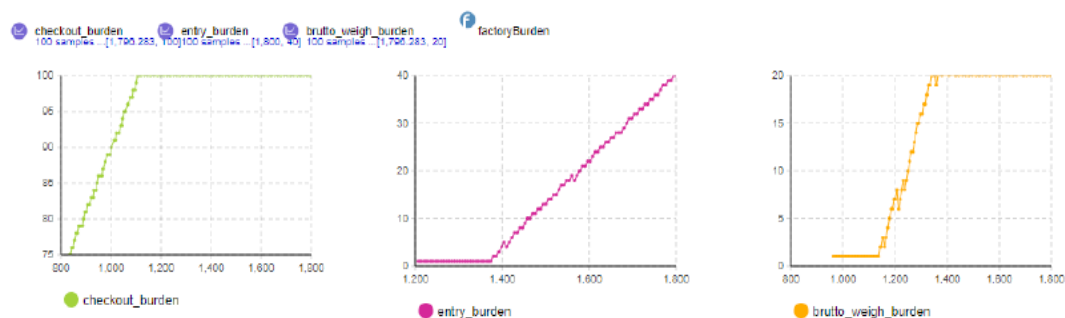


Рис. 3. Результаты прогона модели (размеры очередей машин на приемку, взвешивание и пропускной пункт)

Figure 3. Simulation results (the number of cars in the queue for acceptance, weighing and checkpoint)

Optimization - Optimization Experiment

Name: ☐ Ignore

Top-level agent:

Optimization engine:

Objective: ☐ minimize ☒ maximize

`root.factoryBurden()`

Number of iterations

☒ Fixed:

☐ Infinite

Maximum available memory: Mb

Рис. 4. Условия оптимизационного эксперимента с моделью (система AnyLogic)
Figure 4. Optimization experiment conditions the with the model (AnyLogic system)

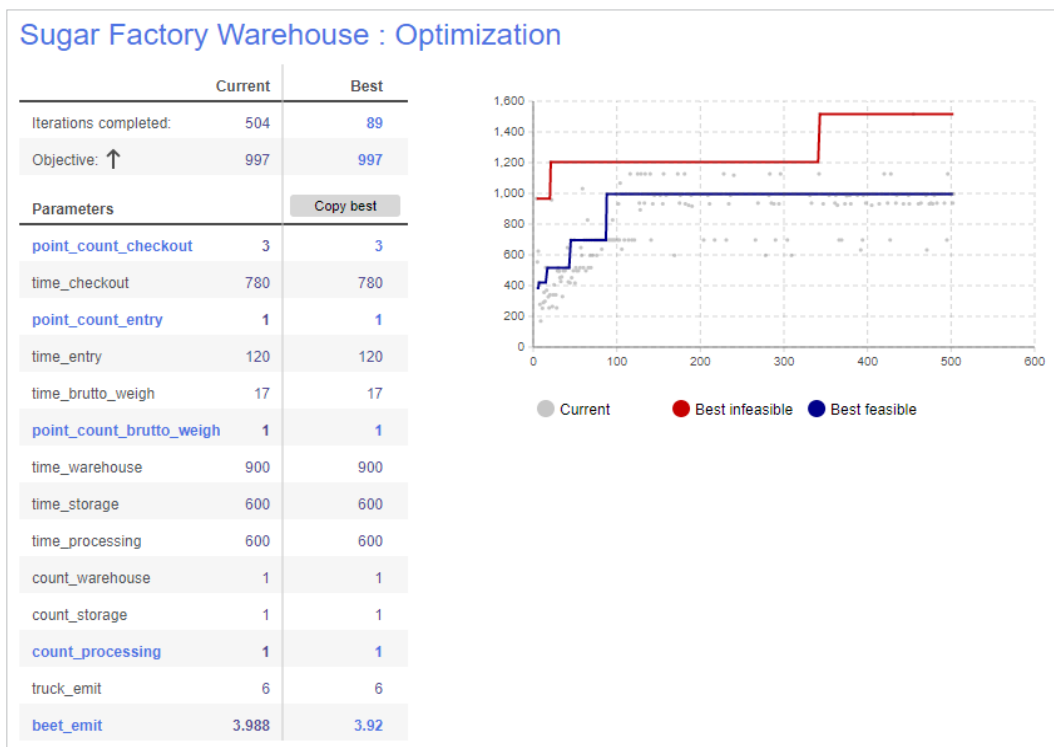


Рис. 5. Результаты первого оптимизационного эксперимента с текущей нагрузкой на основные устройства приемочного цеха
Figure 5. Results of the initial optimization experiment with the current workload on the main devices of the acceptance workshop

Эксперимент показал, насколько можно увеличить нагрузку в системе. Для этого необходимо увеличить количество контрольных проверок до трех (переменная «point_checkout»). Также определена оптимальная скорость загрузки грузовой машины – каждые 6 мин.

График, приведенный на рисунке 6, показывает изменения максимального значения оптимизируемой функции «*factoryBurden*», в приближении отражающей закон напряжения цифрового двойника. Данный график показывает наиболее подходящие и неподходящие максимумы функции в соответствии с ограничениями.

Для проверки качества результатов эксперимента проведен прогон модели с предложенным в ходе эксперимента набором параметров системы. Результаты симуляции представлены на рисунке 6.

Повторный прогон модели показал, что с данным набором параметров нагрузка в системе равномерно распределяется по всему каналу, о чем свидетельствуют метрики загруженности очередей. Теперь в каждой очереди стабильно присутствуют от 0 до 1 машины, в то время как операционные блоки постоянно работают с небольшими перерывами между обслуживающими сессиями.

Далее проверена возможность увеличения нагрузки прибывающих в цех автомобилей. Также сравнен результат повторного оптимизационного эксперимента с первичным экспериментом, который был направлен на выравнивание текущей нагрузки на узлы системы.

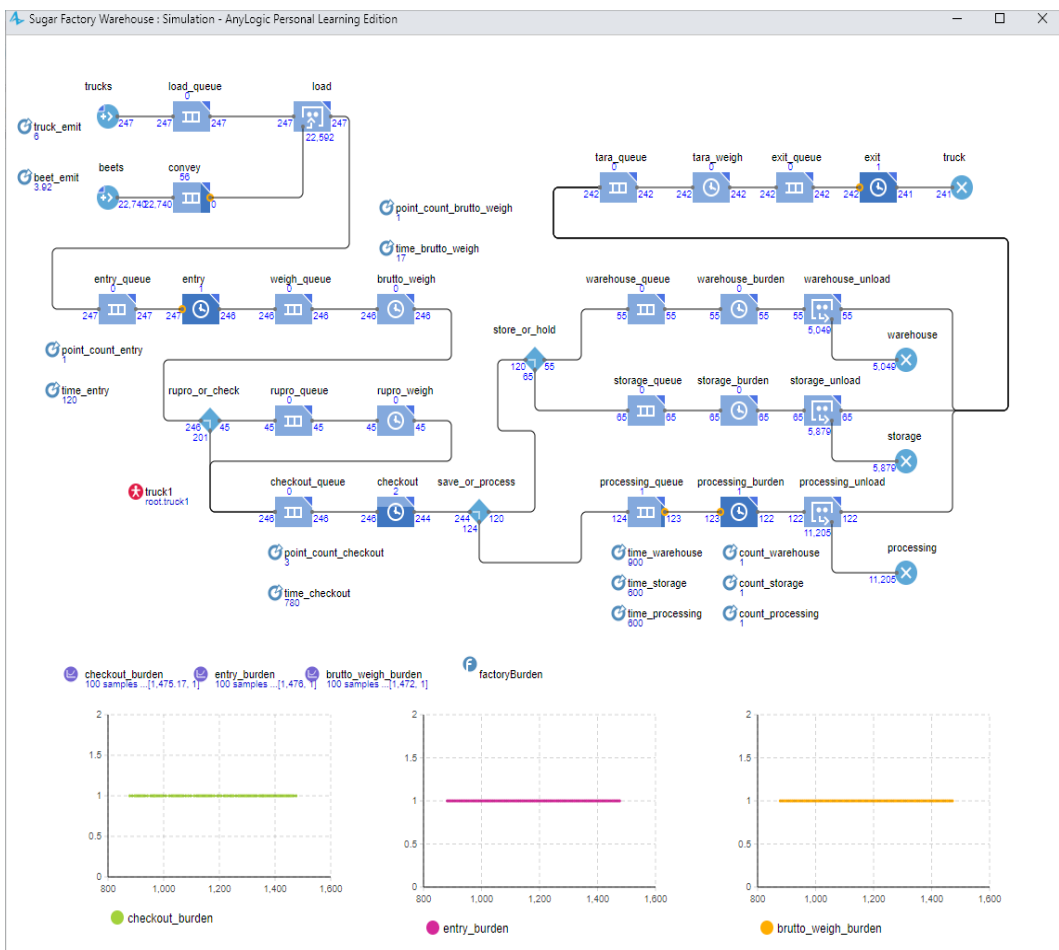


Рис. 6. Результаты симуляции с применением результатов первичной оптимизации

Figure 6. Simulation results using primary optimization results

Оптимизационный эксперимент с варьируемыми параметрами (нагрузка автомобилей, интервал прибытия грузового автомобиля (truck_emit) и дополнительные краевые условия (отсутствие очереди из автомобилей на загрузку ($\text{root.load_queue.size()}\leq 0$))) показал, что можно и целесообразно сократить интервал прибытия грузовых автомобилей в цех с 6 до 3 мин. Вслед за этим увеличилось число рабочих точек контрольной проверки с трех до пяти, число рабочих точек пункта выгрузки свеклы переработки – с одного до двух.

Результат вторичной оптимизации представлен на рисунке 7.

В итоге обобщенная функция нагрузки на цех «*factoryBurden*» сократилась почти в 2 раза. Результаты эксперимента с моделью при новых параметрах приведены на рисунке 8.

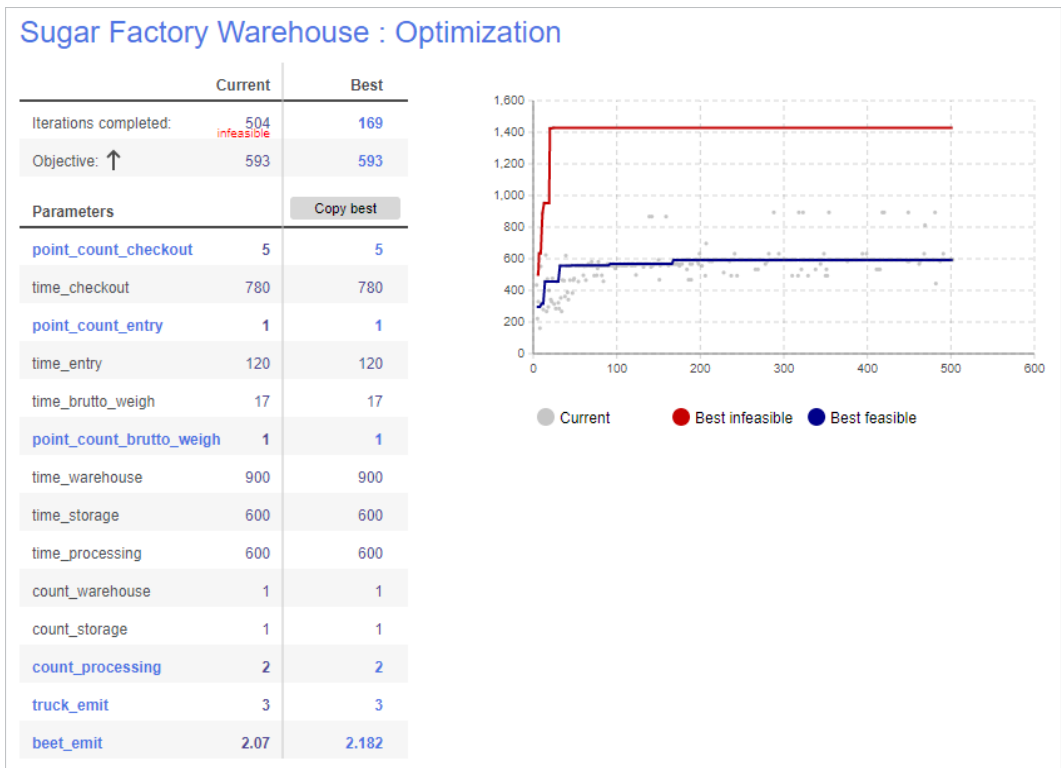


Рис. 7. Результаты эксперимента с вариацией нагрузки агентов (автомобилей)

Figure 7. Results of the experiment with load variation of agents (trucks)

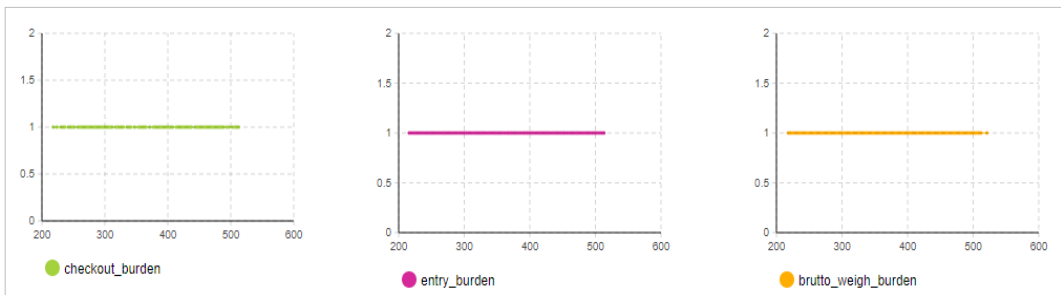


Рис. 8. Результаты эксперимента с повышенными параметрами

Figure 8. Results of the experiment with increased parameters

При таких параметрах бизнес-процесса система (цех) способна принимать в 2 раза больше свеклы, по-прежнему не имея очередей на въезде, взвешивании БРУТТО, контрольной проверке, выгрузке на переработку. Помимо этого, на выгрузке на склад наблюдается планомерно увеличивающееся скопление машин до нескольких десятков в очереди, а на выгрузке в хранилище – до десятка в очереди.

Выводы

Conclusions

В ходе исследований было выявлено, что цифровой двойник производственной системы является эффективным инструментом для оптимизации производственных процессов и повышения эффективности управления. Анализ производства сахара как объекта управления на основе технологии цифровых двойников позволил выявить особенности и принципы построения компьютерных моделей, которые являются основой для разработки цифровых двойников. Использование таких технологий, как интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (AI), робототехника и облачные технологии, позволяет создать комплексную систему управления производством. В результате создания цифрового двойника свеклоприемного цеха сахарного комбината удалось обосновать такие параметры бизнес-процесса, которые позволяют значительно повысить производительность труда и эффективность работы цеха. Благодаря проектированию, симуляции, анализу и оптимизации процессов были проведены виртуальные тесты и эксперименты с цифровым двойником бизнес-процесса, которые помогли выявить узкие места в процессе приемки свеклы и оптимизировать параметры системы, предсказать возможные проблемы и риски в работе цеха.

Список источников

1. Прохоров А., Лысачев М. *Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт*: Монография. Москва: АльянсПринт, 2020. 401 с.
2. Петров С.М., Филатов С.Л., Подгорнова Н.М. Устойчивое развитие сахарного производства на основе цифровых двойников // *Сахар*. 2023. № 11. С. 16–21. <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2023-11-16-21>
3. Бронская Ю.К., Васильева А.С., Гусманов И.У. и др. *Концептуальные основы развития национальной инновационной системы России: структурно-технологическая модернизация отечественной экономики, социально-экономические и технологические факторы развития*: Монография. Самара: НИЦ ПНК, 2025. 268 с. EDN: PBUJ CZ
4. Хафизов А.М., Борщ И.Д. Общие данные о цифровых двойниках и программных платформах управления цифровыми двойниками // *Инновационная наука*. 2025. № 5-2. С. 78–79. EDN: FGMN UX
5. Султан Н., Петров В.Е. Литературный обзор: применение автоматизированных цифровых производственных систем на основе цифровых двойников // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки»*. 2024. № 7-2. С. 168–172. <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2024.7-2.32>
6. Денисов С.Г. Анализ требований для цифровой платформы по разработке и применению цифровых двойников // *Бюллетень инновационных технологий*. 2025. Т. 9, № 1 (33). С. 30–33. EDN: XVYUUY

7. Both S., Eggersglüß J., Lehnberger A. et al. Optimizing Established Processes like Sugar Extraction from Sugar Beets – Design of Experiments versus Physicochemical Modeling. *Chem. Eng. Technol.* 2013;36(12):2125-2136. <http://doi.org/10.1002/ceat.201300484>

8. Сапронов А.Р., Сапронова Л.А., Ермолаев С.В. *Технология сахара: Учебник*. Санкт-Петербург: Профессия, 2013. 294 с.

9. Левенцов В.А., Радаев А.Е., Николаевский Н.Н. Аспекты концепции «Индустрия 4.0» в части проектирования производственных процессов // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2017. Т. 10, № 1. С. 19–31. EDN: YGDCJP

10. Trukhachev V., Bobrishev A., Khokhlova E. et al. Personnel Training for the Agricultural Sector in Terms of Digital Transformation of the Economy: Trends, Prospects and Limitations. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(1):2145-2155. EDN: WUHBRA

11. Шананин В.А., Лосев К.Ю. Создание цифровых двойников в строительстве при помощи искусственного интеллекта // *Инновации и инвестиции*. 2023. № 6. С. 537–360. EDN: NXXOJC

12. Xie J., Jiang H., Qin S. et al. A New Description Model for Enabling More General Manufacturing Systems Representation in Digital Twin. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024;72:475-491. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.12.009>

13. Zhao J., Aghezzaf E.-H., Cottyn J. An Extension of the Core Manufacturing Simulation Data Standard to Enhance the Interoperability for Discrete Event Simulation. *Procedia CIRP*. 2024;130:1632-1637. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.293>

14. Thüerer M., Li S.S., Qu T. Digital Twin Architecture for Production Logistics: The Critical Role of Programmable Logic Controllers (PLCs). *Procedia Computer Science*. 2022;200:710-717. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.269>

15. Lehnberger A. Industrial Internet of Things for the Sugar Industry-initial Results. *Chemie Ingenieur Technik*. 2020;92(7):978-982. <https://doi.org/10.1002/cite.202000005>

16. Паршина И.С., Фролов Е.Б. Разработка цифрового двойника производственной системы на базе современных цифровых технологий // *Экономика промышленности*. 2020. Т. 13, № 1. С. 29–34. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2020-1-29-34>

References

1. Prokhorov A., Lysachev M. *Digital twin. Analysis, trends, world experience: a monograph*. Moscow, Russia: All'ansPrint, 2020:401. (In Russ.)

2. Petrov S.M., Filatov S.L., Podgornova N.M. Sustainable development of sugar production based on digital twins. *Sakhar*. 2023;(11):16-21. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2023-11-16-21>

3. Bronskaya Yu.K., Vasil'eva A.S., Gusmanov I.U., Gusmanov R.U. et al. *The conceptual foundations of the development of the national innovation system of Russia: structural and technological modernization of the domestic economy, socio-economic and technological factors of development: a monograph*. Samara, Russia: NITs PNK, 2025:268. (In Russ.)

4. Khafizov A.M., Borsch I.D. General data on digital twins and software platforms for managing digital twins. *Innovative Science*. 2025;(5-2):78-79. (In Russ.)

5. Sultan N., Petrov V.E. Literature review: application of automated digital production systems based on digital twins. *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy*

teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2024;(7-2):168-172. (In Russ.) <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2024.7-2.32>

6. Denisov S.G. Analysis of requirements for a digital platform for the development and application of digital twins. *Bulletin of innovative technologies.* 2025;9(1(33)):30-33. (In Russ.)

7. Both S., Eggersglüß J., Lehnberger A., Schulz T. et al. Optimizing Established Processes like Sugar Extraction from Sugar Beets – Design of Experiments versus Physicochemical Modeling. *Chem. Eng. Technol.* 2013;36(12):2125-2136. <http://doi.org/10.1002/ceat.201300484>

8. Sapronov A.R., Sapronova L.A., Ermolaev S.V. *Technology of sugar: a textbook.* Saint Petersburg, Russia: Professiya, 2013:294. (In Russ.)

9. Leventsov V.A., Radaev A.E., Nikolaevskiy N.N. The aspects of the “Industry 4.0” concept within production process design. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics.* 2017;10(1):19-31. (In Russ.)

10. Trukhachev V., Bobrishev A., Khokhlova E., Fedisko O. et al. Personnel Training for the Agricultural Sector in Terms of Digital Transformation of the Economy: Trends, Prospects and Limitations. *International Journal of Civil Engineering and Technology.* 2019;10(1):2145-2155.

11. Shananin V.A., Losev K.Yu. Creating digital doubles in construction using artificial intelligence. *Innovation and Investment.* 2023;(6):537-360. (In Russ.)

12. Xie J., Jiang H., Qin S., Zhang J. et al. A new description model to provide a more general representation of production systems in a digital double. *Journal of Manufacturing Systems.* 2024;72:475-491. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.12.009>

13. Zhao J., Aghezzaf E.-H., Cottyn J. An Extension of the Core Manufacturing Simulation Data Standard to Enhance the Interoperability for Discrete Event Simulation. *Procedia CIRP.* 2024;130:1632-1637. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.293>

14. Thüerer M., Li S.S., Qu T. Digital Twin Architecture for Production Logistics: The Critical Role of Programmable Logic Controllers (PLCs). *Procedia Computer Science.* 2022;200:710-717. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.269>

15. Lehnberger A. Industrial Internet of Things for the Sugar Industry-initial Results. *Chemie Ingenieur Technik.* 2020;92(7):978-982. <https://doi.org/10.1002/cite.202000005>

16. Parshina I.S., Frolov E.B. Development of a digital twin of the production system on the basis of modern digital technologies. *Russian Journal of Industrial Economics.* 2020; 13(1):29-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2020-1-29-34>

Сведения об авторах

Елена Викторовна Худякова, д-р экон. наук, профессор, профессор кафедры прикладной информатики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: evhduyakova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7875-074X>

Марина Николаевна Степанцевич, канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры прикладной информатики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: stepantsevich@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7125-3027>

Константин Сергеевич Музалёв, ассистент кафедры прикладной информатики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»; 127550, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: kmuzalev@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6054-2934>

Information about the authors

Elena V. Khudyakova, DSc (Econ), Professor, Professor at the Department of Applied Computer Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: evhudyakova@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7875-074X>

Marina N. Stepantsevich, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Applied Computer Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: stepantsevich@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7125-3027>

Konstantin S. Muzalev, Assistant Professor at the Department of Applied Computer Science, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127550, Russian Federation; e-mail: kmuzalev@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6054-2934>