

## СТАТЬИ

УДК 681.5:664.681.2  
DOI 10.17513/snt.40273

## КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МОНИТОРИНГА ПРОИЗВОДСТВА ВАФЕЛЬ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Антонов С.В.

*ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,  
Москва, e-mail: antonov@mirea.ru*

Целью работы являлась разработка концептуальной модели мониторинга технологических процессов на примере производства вафель. Предлагаемая концептуальная модель и комплекс методов и алгоритмов ориентированы на применение в условиях многорецептурного пищевого производства, где реализуется множество технологических процессов, для которых актуально использование технологии цифровых двойников. Результаты ранее проведенных исследований были адаптированы под новые производственные условия, ключевым аспектом которых являлась привязка цифрового двойника технологического процесса к партии вафель. Применимость концептуальной модели мониторинга технологических процессов стал высокий уровень автоматизации и цифровизации производства, при котором технология цифровых двойников может быть эффективно реализована. В статье рассмотрен состав концептуальной модели мониторинга технологических процессов производства вафель, описаны изменения и некоторые вопросы, необходимые для ее дальнейшего внедрения. В обобщенном виде представлены концептуальная и математическая модели системы мониторинга на основе технологии цифровых двойников. Полученная математическая модель мониторинга на основе теории множеств, разработанные методы создания, представления, определения и модификации, а также алгоритмы создания, фиксации значений параметров и ресурсного обеспечения технологических процессов при их внедрении формируют основу для дальнейшей цифровой трансформации предприятия и повышения его эффективности.

**Ключевые слова:** автоматизация, цифровой двойник, концептуальная модель, цифровизация, мониторинг, умное производство, вафли

## CONCEPTUAL MODEL FOR MONITORING WAFFLES PRODUCTION BASED ON DIGITAL TWIN TECHNOLOGY

Antonov S.V.

*MIREA – Russian technological university, Moscow, e-mail: antonov@mirea.ru*

The purpose of the work was to develop a conceptual model for monitoring technological processes, using waffle production as an example. The proposed conceptual model and set of methods and algorithms are intended for application in multi-recipe food production, conditions that implement numerous technological processes, where the use of digital twins is especially relevant. The results of previous studies were adapted to new production conditions, with a key adjustment being the linking of the digital twin of the technological process to a specific batch of waffles. A high level of automation and digitalization of production processes was identified as a critical condition for the applicability of this approach, ensuring that digital twin technology can be effectively implemented. The paper considers the composition of the conceptual model for monitoring technological processes of waffle production, describes the changes and details necessary for its further implementation. The conceptual and mathematical model of the monitoring system based on digital twin technology are presented in a generalized form. The resulting mathematical model of monitoring based on set theory, the developed methods of creation, presentation, definition and modification, as well as algorithms for creation, recording of parameter values and resource provision of technological processes during their implementation form the basis for further digital transformation of the enterprise and increasing its efficiency.

**Keywords:** automation, digital twin, conceptual model, smart production, digitalization, monitoring, waffles

### Введение

Современное производство характеризуется повсеместным применением перспективных информационных технологий на всех стадиях жизненного цикла изделия. Широкая цифровая трансформация производств различных отраслей поддерживается не только на уровне управления предприятием из-за необходимости обеспечивать его конкурентоспособность, но и на государственном уровне. В России действует проект «Умное производство» стратегического развития предприятий в

области цифровой трансформации согласно распоряжению Правительства РФ от 6 ноября 2021 г. № 3142-р [1]. Однако рыночный спрос вынуждает производить кастомизированный продукт для удовлетворения потребностей большего числа потребителей и увеличения объема продаж [2].

Пищевое производство также развивается в соответствии с указанными выше программами развития. Однако в отрасли кондитерского производства (и вафель, в частности) наблюдается тенденция применения последних научных исследований

по улучшению рецептур [3] и совершенствованию технологии производства [4] без рассмотрения вопросов цифровизации процессов и сбора данных.

Проводя обзор публикаций по теме исследования, можно обнаружить, что в работе [5] рассматривается вопрос использования цифрового двойника производства вафель, который бы позволял выполнять моделирование процессов еще на стадии проектирования. В статье [6] приводится подход к снижению себестоимости изделий из вафель через изменение рецептуры и введение системы управления отходами. В работе [7] предлагается интеллектуальный программно-аппаратный комплекс управления качеством кондитерских изделий.

Подходы в большинстве рассмотренных работ сложно отнести к концепции развития умного производства [1], а также эти работы не выводят отрасль и существующие подходы на качественно новый технологический уровень, хотя в современных ИТ-решениях потребность сохраняется [8]. По-прежнему в кондитерской отрасли остаются нерешенными задачи обеспечения эффективного сбора и контроля данных о протекающих технологических процессах, организации единого информационного пространства и мониторинга параметров выпускаемых изделий на всех стадиях их жизненного цикла [9], а также обеспечения безопасности рецептур выпускаемых изделий [10].

Таким образом, можно утверждать, что отрасль кондитерского производства нуждается в разработке решений, которые позволили бы существенно продвинуться в модернизации действующих предприятий и проектировании новых. Учитывая малое количество публикаций по теме работы, проведение исследований в данном направлении актуально для обеспечения цифровой трансформации предприятий, их устойчивого развития и обеспечения конкурентоспособности.

**Цель исследования** – разработка концептуальной модели мониторинга технологических процессов на примере производства вафель для повышения его эффективности с применением технологии цифровых двойников.

#### **Материал и методы исследования**

Концептуальная модель мониторинга технологических процессов производства вафель строилась на основе комплекса соответствующих методов и алгоритмов, а также на базе ряда предшествующих исследований, изложенных в работах [11, 12]. В этих работах комплекс методов и алгоритмов рассматривался применительно к ма-

шиностроительному производству, но объект исследования был изменен на технологический процесс производства вафель по причине недостатка необходимых производственных данных. Можно отметить общность условий технологического процесса многорецептурного производства вафель и мелкосерийного многономенклатурного технологического процесса обработки материалов резанием, где можно выделить:

- многорецептурность (многономенклатурность) производства (большой ассортимент вафель с разными начинками, фасовками продукции и пр.), т.е. реализацию множества технологических процессов;
- применимость цифровых двойников для сбора производственных данных [12];
- потенциал повышения эффективности производства за счет систематизации несвязанных данных по разным технологическим процессам, партиям, рецептурам, которые реализуются в рамках одной производственной площадки (одного цеха);
- высокий уровень автоматизации производства и сбора данных на разных стадиях жизненного цикла изделия, наличие основы для организации единого информационного пространства предприятия.

Ранее в работе [12] были предложены: концептуальная структура, объектно-ориентированная структура параметров и ресурсов, метод определения, метод создания цифрового двойника технологического процесса и основы методики. В статье [11] была описана методика мониторинга машиностроительного технологического процесса, формализованная в нотации IDEF0 и IDEF3, реализующая функции загрузки и коррекции цифрового двойника, ресурсного определения, фиксирования параметров и анализа данных на основе принципов разработки информационного программного обеспечения, позволяющая формировать цифровой паспорт изделия, отчетность и логи, обеспечивая цифровую трансформацию предприятия [13].

Путем применения методов системного анализа, а также функционального и объектно-ориентированного подходов к моделированию исследование было адаптировано к условиям многорецептурного производства вафель в соответствии с его особенностями.

В отличие от работы [5], в настоящем исследовании рассматривается вопрос создания цифрового двойника технологического процесса, содержащего информацию о его параметрах и ресурсном обеспечении в режиме реального времени, когда как в подавляющем большинстве работ по данной тематике была поставлена задача разработки цифрового двойника объекта автоматизи-

зации или производства. Однако в работах [14, 15] по теме мониторинга производства вафель решение задачи строится на анализе рисков и критических контрольных точек (ХААСП).

### Результаты исследования и их обсуждение

#### А. Условия применения предлагаемого комплекса методов и алгоритмов

Несмотря на то что задачей системы мониторинга технологических процессов производства вафель и конечной целью работы являлось повышение эффективности производства вафель, предложенные подходы требовали определенной основы для их разработки и последующей реализации. С учетом ранее обсужденных условий методы и алгоритмы характеризуются тем, что:

- позволяют осуществлять эффективный сбор и хранение данных о технологических процессах на основе их систематизации и применения цифровых двойников на уровне цеха;
- обладают гибкостью и масштабируемостью на уровне цеха;
- позволяют выполнять мониторинг процессов в режиме реального времени;

– обеспечивают выполнение оперативного контроля данных технологического процесса и его ресурсного обеспечения, а также постпроизводственного анализа.

#### Б. Концептуальная модель мониторинга технологических процессов производства вафель

После получения требований и условий мониторинга технологических процессов производства вафель стало возможным формирование новой концептуальной модели мониторинга технологических процессов.

Основной научной идеей является использование двух типов цифровых двойников –  $\alpha$ -ЦД и  $\beta$ -ЦД. На основе этой идеи была сформирована концептуальная модель мониторинга технологических процессов, состоящая из комплекса методов и алгоритмов для формирования обоих типов цифровых двойников (рис. 1). Концептуальная модель мониторинга, алгоритмы и методы мониторинга применительно к технологическому процессу производства вафель, использование данных рецептуры и реального технологического процесса при ее реализации позволят получить методику мониторинга в условиях производства вафель классических.

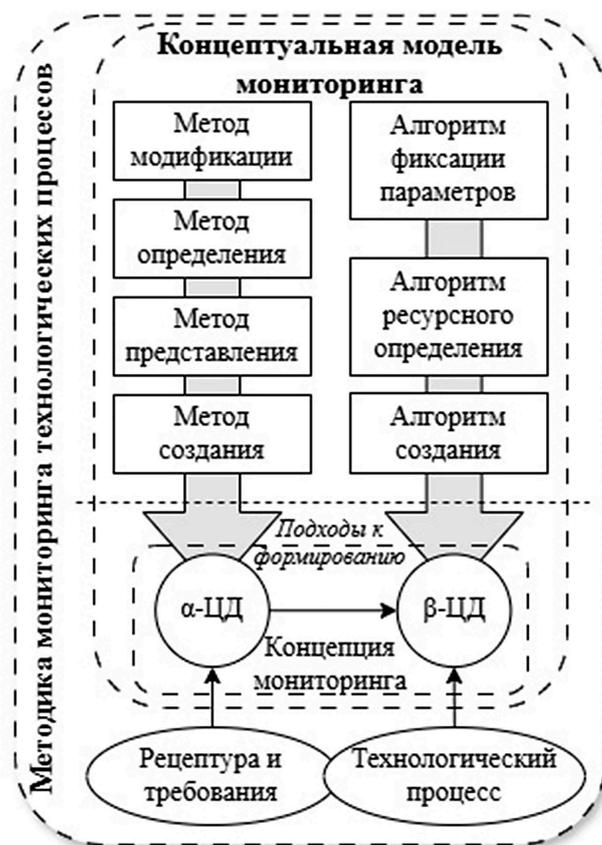


Рис. 1. Концептуальная модель мониторинга технологических процессов производства вафель

*В. Адаптация методов и алгоритмов под концептуальную модель мониторинга производства вафель*

Для адаптации предложенных ранее цифровых двойников обоих типов была выполнена коррекция их характеристик. В условиях многорецептурного производства вафель привязка цифровых двойников выполняется не к каждому изделию, а к партии из-за особенностей маркировки изделий и объема их выпуска. Тип  $\alpha$ -ЦД должен формироваться уже на стадии разработки рецептуры и корректироваться технологом, а  $\beta$ -ЦД – аналогично, но уже на стадии производства, и включать параметры технологического процесса и его ресурсного обеспечения. Так, метод представления включает стадии производства вафель, а конечным экземпляром является параметр группы, а не изделия.

С помощью теории множеств были описаны отображения множеств параметров ( $\Delta$ ), технологических процессов ( $\Gamma$ ) и множеств двойников ( $A$  и  $B$ ). Причем отображения  $f_1$  и  $f_2$  не обладают свойствами инъективности, сюръективности или биективности

(рис. 2а), так как некоторые технологические процессы могут быть не запущены в производство, как и  $\alpha$ -ЦД. Отображения  $f_3, f_4$  и  $f_5$  сюръективны (рис. 2б), так как соблюдается соответствие каждому элементу множеств параметров ( $\Delta$ ) множеств цифровых двойников ( $A$  и  $B$ ) и технологических процессов ( $\Gamma$ ). Такая математическая модель позволяет наложить ограничения на будущую информационную систему мониторинга технологических процессов производства вафель, а также получить оценки объемов хранилищ, необходимых для ведения баз данных.

Метод определения накладывает ограничения на количества полей в цифровом двойнике, которые имеют свои значения.  $\alpha$ -ЦД становится определенным на этапе запуска производства, так как требования к нему должны быть сформированы в самом начале.  $\beta$ -ЦД становится определенным после фиксации ресурсного обеспечения. Оба типа цифровых двойников становятся полностью определенными на этапе завершения заказа и теста партии на качество.

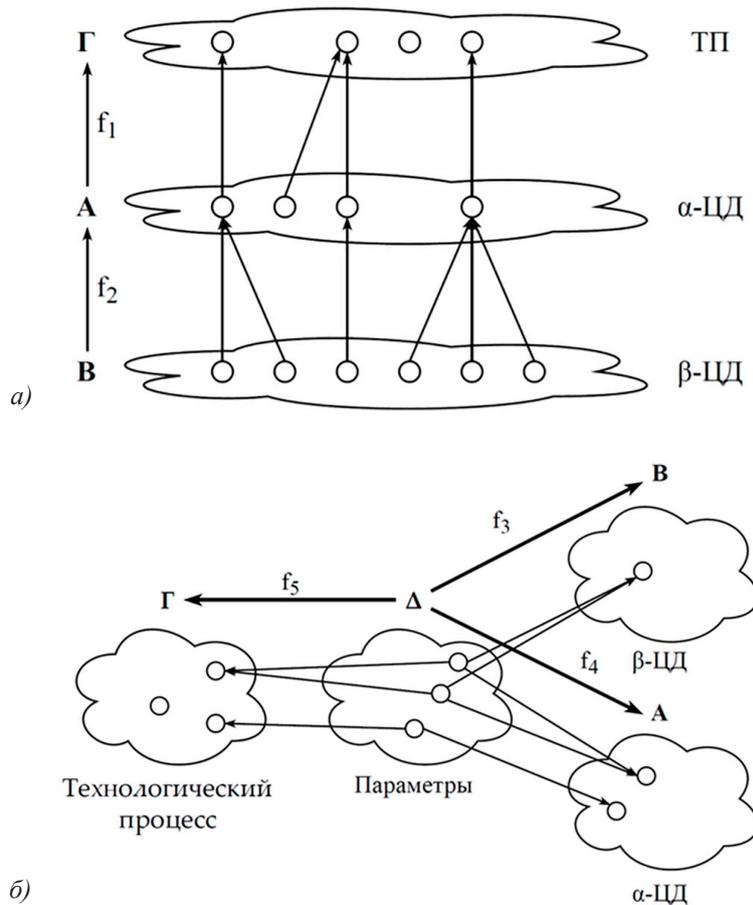


Рис. 2. Отображение множеств цифровых двойников, параметров и процессов



Структура, а также методы создания, внешней и внутренней модификации цифровых двойников с учетом ранее обозначенных изменений остались прежними.

Обобщенный алгоритм фиксации параметров и ресурсного обеспечения технологического процесса показан на рисунке 3.

Алгоритмическая часть модели предполагает загрузку цифровых двойников с проверкой корректности, заключающейся в анализе уникальности имен параметров технологического процесса, верификации критериев определенности полей и контроле версии на основе результатов исполнения метода модификации.

Алгоритм загрузки  $\alpha$ -ЦД осуществляет поиск соответствующего цифрового двойника совместно с информированием оператора об успешности выполнения задачи. Согласно структуре цифрового двойника, которая рассматривалась ранее в статье [12], на этом этапе при необходимом ограничении прав доступа не могут быть изменены требования (допуски) к фиксируемым и контролируемым параметрам технологического процесса, параметрам работы оборудования, ресурсам, персоналу и т.д. Значения, которые вносятся в цифровой двойник в виде фиксируемых в процессе производства партии изделий, автоматически связываются с партией, системой или работником, который их внес, и оборудованием, чтобы в будущем при необходимости отследить причинно-следственную связь возможных ошибок, аварий и неполадок.

Алгоритмы ресурсного обеспечения и фиксации параметров выполняются итерационно для каждой стадии технологического процесса производства вафель. Для ресурсов рассмотрены подзадачи их проверки в соответствии с требованиями из  $\alpha$ -ЦД и допоставки при необходимости. Фиксация параметров предлагает оперативное сопоставление получаемых в ходе реализации технологического процесса значений с заданными диапазонами (из  $\alpha$ -ЦД), реализацию сценариев внесения значений в  $\beta$ -ЦД в ручном режиме, дополнительную фиксацию параметров, сопоставление полученных значений со списками фиксируемых и контролируемых параметров.

### Заключение

Концептуальная модель, а также методы и алгоритмы в ее составе позволят создавать системы автоматизированного мониторинга технологических процессов производства вафель, а при их модификации – аналогичные системы для других тех-

нологических процессов. Систематизация производственных данных и установление непосредственной связи между партией и технологическим процессом ее производства обеспечивают цифровую трансформацию предприятия с перспективой повышения эффективности его деятельности.

Предложенная в данной работе концептуальная модель мониторинга технологических процессов производства вафель позволяет адаптировать современные ИТ-технологии к пищевой промышленности и задачам мониторинга технологических процессов, определяет подходы применения технологии цифровых двойников для сбора и систематизации данных этих технологических процессов, способствует модификации и развитию существующих подсистем сбора и анализа данных АСУ ТП.

### Список литературы

1. Распоряжение Правительства РФ от 06.11.2021 г. N 3142-р «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности.» 2021. 12 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202111090018> (дата обращения: 13.11.2024).
2. Жукова Ю.С., Ларинина Т.И. Обоснование необходимости расширения ассортимента печенья на основе стратегического анализа предприятия кондитерской промышленности // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2022. № 4. С. 10-15. DOI: 10.24412/2311-6447-2022-4-10-15.
3. Устинова Ю.В., Шевченко Т.В., Попов А.М., Плотников К.Б., Ермолаева Е.О., Миллер Е.С. Разработка рецептуры и качественных характеристик продуктов питания на основе злаков // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84, № 1(91). С. 43-48. DOI: 10.20914/2310-1202-2022-1-43-48.
4. Hovhannisyann N., Abrahamyan S., Badalyan A., Abrahamyan V., Grigoryan V., Abovyan A., Grigoryan L. Development of technology for the production of Dutch waffles (stroopwafels) from using domestic soybean flour // Bioactive Compounds in Health and 2024. Vol. 7. Is. 8. P. 348–360. DOI: 10.31989/bchd.v7i8.1409.
5. Гарев К.В., Карелина Е.Б., Благовещенская М.М., Клехо Д.Ю., Благовещенский И.Г. Автоматизация технологического процесса производства вафель и возможность использования цифрового двойника в качестве инновационного инструмента // Интеллектуальные системы и технологии в отраслях пищевой промышленности: сборник материалов конференции: сборник материалов конференции (23 апреля 2019 г.). М.: Издательство МГУПП, 2019. С. 40–46.
6. Ashwini H.D., Sanjana V., Neelagund S.E., Sandeepa D.N., Sneha B.S., Ajay K.R. Mitigating Waste through Valorization of Waffle Cones: Exploring the Potential of Banana Peel and Jackfruit Seeds in Sustainable Waste Management Solutions // International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT). 2024. Vol. 9, Is. 9. P. 474–481. DOI: 10.38124/ijisrt/IJISRT24SEP818.
7. Музыка М.Ю., Благовещенский И.Г., Благовещенский В.Г., Головин В.В., Благовещенская М.М., Качура И.А. Технические решения для реализации программно-аппаратного комплекса управления качеством пищевой продукции // Вестник ВГУИТ. 2021. Т. 83, № 4(90). С. 49-56. DOI: 10.20914/2310-1202-2021-4-49-56.
8. Али Б.А. Цифровые технологии в развитии пищевой промышленности // Вестник Академии знаний. 2020. № 41(6). С. 23-27. DOI: 10.24412/2304-6139-2020-10754.

9. Благовещенский В.Г., Клягин М.М., Серебрянкин, В.А. Обучение работников ручной сборке изделий с использованием интерактивного сопровождения и машинного зрения // Автоматизация. Современные технологии. 2024. Т. 78, № 4. С. 188-192. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-4-188-192.
10. Мистенева С.Ю., Щербакова Н.А., Савенкова Т.В., Мизинчикова И.И. Комплексная фортификация рецептурного состава как основа создания мучных кондитерских изделий // Пищевая промышленность. 2020. № 12. С. 41-47. DOI: 10.24411/0235-2486-2020-10142.
11. Антонов С.В. Функциональное моделирование системы мониторинга технологических процессов на основе концепции цифрового двойника // Автоматизация. Современные технологии. 2023. Т. 77, № 8. С. 345-351. DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-8-345-351.
12. Холопов В.А., Антонов С.В., Курнасов Е.В., Каширская Е.Н. Разработка и применение цифрового двойника машиностроительного технологического процесса // Вестник машиностроения. 2019. № 9. С. 37-43.
13. Курнасов Е.В., Шапетько Л.А. Микросервисная информационно-управляющая система для цифровизации документооборота проектов АСУ ТП // Автоматизация. Современные технологии. 2024. Т. 78, № 1. С. 41-47. DOI: 10.36652/0869-4931-2024-78-1-41-47.
14. Астахова Н.В., Ермолаева Е.О., Трофимова Н.Б. Разработка системы менеджмента безопасности пищевых продуктов на основе принципов ХАССП при производстве вафель шоколадных // Пищевая промышленность. 2020. № 5. С. 39-43. DOI: 10.24411/0235-2486-2020-10053.
15. Резниченко И.Ю., Чистяков А.М. Особенности внедрения процедур, основанных на принципах ХАССП, для обогащенных мучных кондитерских изделий // Хранение и переработка сельхозсырья. 2020. № 1. С. 99-109. DOI: 10.36107/spfr.2020.207.