

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО САХАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

С.М. Петров¹, С.Л. Филатов², М.С. Михайличенко²

¹ *Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского, Москва, Россия*

² *ООО НТ-Пром, Москва, Россия*

Четвертая промышленная революция стимулирует отрасли пищевой промышленности к переходу от традиционного производства к интеллектуальному производству. В ходе этой трансформации существующее оборудование, процессы или устройства оснащаются некоторыми дополнительными датчиками, включая датчики программного типа (Soft Sensor) и другими киберфизическими системами (CPS) и адаптируются к цифровому производству, которое представляет собой сочетание критически важных технологий. В текущем сценарии Индустрии 4.0 сахарная промышленность ориентируется на разработку наилучших доступных и экономически эффективных технологий и процессов для повышения качества сахара с помощью платформы цифровых двойников (DT, Digital Twin), которая позволяет пользователю отслеживать, моделировать, контролировать, оптимизировать и выявлять дефекты и тенденции в текущем процессе, а также снижает вероятность ошибок, подверженных риску со стороны человека.

Технический прогресс, повышение глобальной конкурентоспособности, диверсификация требований потребителей, динамичные рыночные тенденции, цифровизация и постоянно усложняющиеся технологические процессы 21-го века оказали значительное влияние на традиционные отрасли обрабатывающей промышленности. Такая ситуация подталкивает традиционные производственные отрасли к интеллектуальному производству, которое объединяет элементы (роботы, большие данные, облачные вычисления, Интернет вещей (IoT), промышленный Интернет вещей (IIoT), моделирование и т. д.) платформы Индустрии 4.0 [7]. Это помогает в разработке процессов или продуктов со встроенными возможностями, такими как принятие решений, оптимизация производительности, реконфигурация и адаптация в рамках заявленной структуры. Наряду со всеми преимуществами интегрированных элементов, внедрение цифровых технологий и техническое обслуживание по-прежнему являются сложными задачами в интеллектуальном производстве.

Техническое обслуживание является одним из ключевых факторов, влияющих на отрасль экономически и привлечших особое внимание в эпоху цифровизации. С использованием передовых технологий диагностических цифровых двойников, включающих датчики, исполнительные механизмы и системы автоматизации, техническое обслуживание стало ключевым вопросом в современной промышленности. Общие затраты на техническое обслуживание оцениваются примерно в 15–40 % от общей стоимости производства. Отсутствие мероприятий по техническому обслуживанию приводит к внезапному выходу оборудования из строя, незапланированным простоям, потере производительности, а также увеличению производственных затрат и времени. Следовательно, для решения этой проблемы необходимо развернуть надлежащую стратегию технического обслуживания. В целом, существует три стратегии технического обслуживания, а именно: профилактическое обслуживание, реактивное обслуживание и проактивное (predictive) обслуживание. Профилактическое обслуживание является аналогом планового технического обслуживания, при котором действия по техническому обслуживанию планируются или синхронизируются в зависимости от технологического процесса или производственного цикла. Слишком высокая частота профилактических ремонтов приводит к увеличению производственных затрат, чрезмерным плановым простоям оборудования, потерям ресурсов. Реактивное обслуживание – это разновидность технического обслуживания, основанного на отказах, при котором техническое обслуживание выполняется после выхода из строя оборудования или компонента. Его также называют «корректирующим обслуживанием» или «техническим обслуживанием при поломке». Реактивное обслуживание приводит к внезапному выходу оборудования из строя, незапланированным простоям, потерям производительности и увеличению себестоимости продукции.

Среди всех стратегий технического обслуживания проактивное (predictive) обслуживание является наиболее экономически эффективной стратегией технического обслуживания, которая позволяет планировать техническое обслуживание, когда оборудование или техника нуждаются в техническом

обслуживании. Оно основано на условиях эксплуатации, а его производительность основана на прогнозах, сделанных на основе сигналов, полученных от машины. Проактивное обслуживание имеет различные преимущества по сравнению с традиционными стратегиями технического обслуживания, такие как более раннее обнаружение неисправностей, сокращение времени простоя, повышение надежности, снижение затрат и повышение производительности. Проактивное обслуживание экономит примерно 8–12 % по сравнению с профилактическим обслуживанием и до 40 % по сравнению с реактивным обслуживанием. Кроме того, в нынешнюю эпоху Индустрии 4.0 интеллектуальные стратегии технического обслуживания с помощью диагностических цифровых двойников (DT), идентифицирующих сбои и обнаруживающих нештатное поведение оборудования, могут предложить огромные преимущества по сравнению с существующими подходами к техническому обслуживанию.

В рамках парадигмы Индустрии 4.0 технологические достижения в области киберфизических систем (CPS) и постоянное совершенствование структур умного производства все более развивают концепцию «цифрового двойника». DT – это систематическая интеграция между физическим и виртуальным объектами посредством различных коммуникаций, а также данных процесса в реальном времени. Развитие вспомогательных технологий, таких как аналитика данных, IoT, PoT, большие данные, облачные вычисления, датчики, дополненная и виртуальная реальность, моделирование, искусственный интеллект и т. д., способствует бесшовной интеграции DT в различные объекты. Среда DT позволяет принимать решения в режиме реального времени, быстро перенастраивать и оптимизировать производственные процессы. Это также способствует повышению надежности, производительности, снижению рисков, раннему обнаружению неисправностей и сокращению времени простоя.

DT – это смесь больших данных, облачных вычислений, IoT, PoT, датчиков, искусственного интеллекта, машинного обучения и многих других технологий. Эти технологии находятся на пути постоянного развития. Следовательно, предполагается, что DT постоянно развивается вместе с этими технологиями. За последние четыре десятилетия цифровые двойники производственных процессов претерпели значительную технологическую эволюцию. Последние технологические достижения в области датчиков, мониторинга и инструментов принятия решений в рамках Индустрии 4.0 позволили точно внедрить цифровой двойник для мониторинга и оптимизации процесса в режиме реального времени. В 2003 году профессор Гривз из Мичиганского университета предложил концепцию виртуального цифрового представления эквивалентных физических продуктов с использованием трех компонентов, а именно: виртуального объекта, физического объекта и сетей информации и данных.

Для надлежащей интеграции устройств с их виртуальными копиями в киберфизической области и эффективного обмена информацией и данными между цифровыми двойниками, физическими двойниками и внешним миром была предложена шестиуровневая архитектура DT (рис. 1).

Архитектура включает в себя различные физические устройства, датчики и системы сбора данных в физической области во время передачи, обработки, сбора, вычислений и обмена данными в виртуальной среде. В архитектуре уровни 1 и 2 представляют собой физическую сущность или устройство. Уровень 1 включает в себя исполнительные механизмы, датчики и другие физические устройства, в то время как источник данных физического объекта определяется уровнем 2. Уровень 3 содержит локальное хранилище данных, которое получает значения контроллера от уровня 2. Интерфейс для взаимодействия между различными уровнями архитектуры и физическим объектом находится на уровне 3. Коммуникация на открытой платформе – Унифицированная архитектура (OPC-UA) является наиболее важным элементом для эффективного обмена данными между уровнями. Уровень 4 – это преобразователь данных в информацию, поддерживаемый технологиями IoT. Этот слой повышает ценность информации, полученной с уровня 3, и обрабатывает полученные данные, чтобы сделать их более ценными для верхних уровней архитектуры. Уровень 4 связывает уровень 3 с уровнем 5 путем преобразования данных из уровня 2 в информацию, отправляемую на уровень 5. И здесь OPC-UA играет жизненно важную роль в коммуникации. Уровни 5 и 6 включают репозитории облачных вычислений и инструментов эмуляции и моделирования соответственно. Слой 5 хранит историческую информацию, полученную из предыдущего слоя. Уровень 5 повышает доступность, простоту доступа и точность цифрового двойника. Уровень 6 – это когнитивный уровень архитектуры, который позволяет отслеживать состояние машины в режиме реального времени и содержит

историческую информацию о физическом двойнике. Этот уровень облегчает интеграцию пользователя с виртуальной копией физического двойника, что помогает в принятии решений, оптимизации и прогнозировании различных задач и процессов.

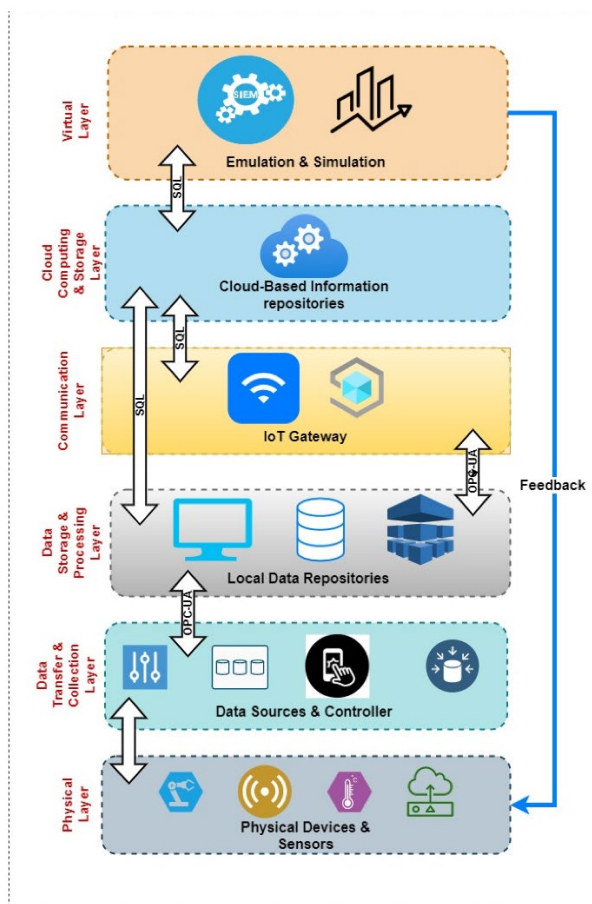


Рис. 1. Шестислойная архитектура цифрового двойника [7]

Интеллектуальное сахарное производство в рамках Индустрии 4.0 использует технологию DT для мониторинга состояния оборудования, профилактического обслуживания, оценки срока службы, оптимизации процессов, экономичного производства и настройки параметров. Модель DT строится с использованием мультисенсорных данных о технологических параметрах оборудования, процессов и имитационных моделей. DT учитывает различные рабочие параметры процесса / оборудования [8, 9]. Как правило, DT используется в локальных производственных участках, а также в работе оборудования. Данные в режиме реального времени также проверяются с помощью имитационных моделей, которые позже генерируют сигнал обратной связи для оптимизации процесса [4, 10].

В работе [5] показана возможность создания цифрового двойника на основе валидированной физико-химической модели как для сложных компонентных систем с множественными ограничениями, так и для сложных процессов с множеством различных фаз экстракции. Требуемые параметры модели могут быть определены с помощью лабораторной установки, которая успешно масштабируется по сравнению с производственной диффузионной установкой. На основе цифрового двойника компоненты могут быть классифицированы, а их поведение при экстрагировании сахарозы можно наблюдать при различных методах реализации. При этом возможность проведения большого количества симуляций или различных рабочих точек может быть использована для создания пространства для проектирования сложного процесса экстрагирования. Таким образом, успешно разработанные пространства для проектирования демонстрируют возможность применения цифровых двойников в процессе разработки на основе системного подхода «качество по дизайну»

Технологические достижения, которые позволяют использовать инструменты и технологии DT, способствуют эффективной интеграции DT в существующие системы. Для разработки и внедрения эффективной модели DT была предложена пятимерная модель DT, которая устраняет барьеры на пути реализации DT в различных областях. Модель может быть сформулирована следующим образом

$$M = (PE, VM, Ss, DD, CN),$$

где PE – физическое лицо, VM – виртуальную модель, Ss – услуги, DD – данные DT, CN – соединения [7].

Согласно пятимерной модели, для успешной реализации DT в реальной среде требуются различные технологии для практического сбора, моделирования, анализа и оценки данных. Последние технологические достижения устраняют технические барьеры при внедрении DT. Для реализации DT в фреймворк DT включены различные методы, такие как дополненная реальность/ виртуальная реальность, IoT, облачные вычисления, машинное обучение и интерфейс прикладного программирования.

Quality-by-Design (QbD). Кроме того, разделение различных эффектов массопереноса позволяет моделировать сложные методы непрерывной экстракции путем разработки эквивалентной технологической схемы путем разделения процесса на фазы мацерации и перколяции.

Впервые был разработан и внедрен цифровой двойник многоступенчатой выпарной установки на реальном промышленном предприятии [3]. С помощью динамической модели было показано, что приложение подходит для обработки колебаний завода, включая запуск и останов завода. Онлайн-измерения с завода передавались в модель в режиме реального времени через прямую связь с PI Server завода. Настройка и валидация проводились в разные периоды времени с использованием в качестве показателей качества образцов сока по шкале Брикса и аналоговых измерений давлений. Процедура обеспечила хорошее соответствие между моделью и данными процесса. Аналогичным образом, хорошие результаты были получены при переходных процессах, где цифровой двойник оставался стабильно работающим после последовательности технологических нарушений. Кроме того, информация о качестве калибровки датчиков может быть получена путем сравнения рассчитанных и наблюдаемых значений на предприятии, что может способствовать управлению техническим обслуживанием. Еще одной важной особенностью является возможность мониторинга индивидуальных KPI, разработанных специально для удовлетворения интересов компании. Наконец, полученные результаты свидетельствуют об успешном применении предложенного цифрового двойника, который функционирует с простой реальной инфраструктурой автоматизации и не требует значительных капитальных затрат на внедрение, обеспечивая важные прогнозы процессов и расширяя возможности мониторинга процессов для повышения операционной эффективности.

Актуальной на сегодняшний день является цифровизация промышленных предприятий, которая является эволюционным продолжением внедрения систем управления производством и производственными операциями (MES/MOM). При этом важную роль играет построение математических моделей различного назначения, которые являются основной составляющей разработки цифрового двойника. Цифровой двойник обеспечивает новую философию ведения производственных процессов предприятия на основе этих моделей, которая направлена на повышение эффективности как отдельных секторов, так и предприятия в целом. Для увеличения прибыли предприятия необходимо обеспечить плановую производительность технологических процессов, конечным показателем которых является выход сахара. Учитывая, что на предприятии действует значительное количество материальных потоков, в работе выделяются только производственные потоки, с которыми работает оператор-технолог. Выбранным потокам на основе экспертных оценок были присвоены взвешенные значения влияния на общие показатели сахарного производства. Это позволило построить математическую модель, которая прогнозирует выход сахара из входных потоков. Структура и параметры этой модели определяются методами машинного обучения. Это нейронная сеть прямого действия MLP 7–23–23–1, которая обеспечивает точность прогноза с погрешностью менее 1 %. Модель может быть использована для моделирования, коррекции и прогнозирования технологических режимов работы предприятия, что позволит повысить общую производительность сахарного завода [2].

Например, в работе [6] разработана цифровая модель, которая может быть использована для описания процесса кристаллизации сахара в промышленности с учетом определенной начальной точки. Предложенная валидированная физико-химическая модель процесса в виде цифрового двойника способна оценить основное влияние фактора температуры и привести к более глубокому пониманию процесса кристаллизации. Это позволяет использовать модель в качестве инструмента прогнозирования для изменения исходной точки и оптимизации результатов процесса. Полученные результаты позволяют квалифицировать модель как цифровой двойник, в отличие от цифровой тени, которая способна предсказать поведение реального объекта только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор данных, но не позволяет моделировать ситуации, в которых реальный объект не эксплуатировался. Однако, гидродинамика жидкости в лабораторном кристаллизаторе значительно отличается от механики жидкости в промышленном кристаллизаторе, и параметры необходимо корректировать на основе данных о промышленной кристаллизации.

С использованием компьютерного моделирования цифрового двойника была разработана трехступенчатая технология кристаллизации для полунепрерывного уваривания утфелей на подготовленной кристаллической основе из затравочной суспензии (первая стадия) и кристаллической

основе из предшествующего утфеля (вторая и третья стадии). Создана компьютерная расчетная модель экспресс-метода определения коэффициента насыщения мелассы. При нагревании до температуры 50–55 °С мелассу переводят в ненасыщенное состояние, затем при кондуктометрическом контроле частично растворяют колеблющиеся кристаллы белого сахара до достижения насыщения. Метод позволяет определить оптимальные параметры стандартной мелассы с учетом технических характеристик кристаллизационного оборудования и центрифуг. На основе имитационного моделирования в программной среде VisSim были проведены испытания и дано обоснование технологии полунепрерывного уваривания утфелей для повышения эффективности кристаллизации в вакуумных аппаратах периодического действия [4].

Затраты и время, необходимые для выполнения сложных процессов, могут быть сокращены с помощью методов компьютерного моделирования, которые позволяют более точно прогнозировать качество продукта. В прогнозных исследованиях доступные данные и распределение этих данных очень важны с точки зрения используемой техники. Метод искусственной нейронной сети лучше, чем другие традиционные методы. Искусственные нейронные сети могут обобщить проблему, изучая отношения и решая проблемы в пределах допустимых пределов ошибок. В исследовании [1] использовали множественную линейную регрессию (MLR), искусственные нейронные сети (ANN) и адаптивные нейронные системы нечеткого вывода (ANFIS) для прогнозирования цветности раствора, которая является одним из критериев контроля качества при производстве сахара. ANFIS представляет собой комбинацию ANN и системы нечеткого вывода (FIS) и обладает скоростью, отказоустойчивостью и адаптивностью. В то время как традиционные методы решают проблему шаг за шагом, искусственный интеллект быстро решает проблемы, работая в реальном времени. Производственные данные сиропов и оттеков при уваривании утфелей, использованные для исследования, были получены в продуктовом отделении сахарного завода, включая такие параметры, как плотность по шкале Брикса, чистота, поляризация, pH, зольность и температура кипения чистой воды. После проведения анализа чувствительности было определено, что зольность, цветность и температура кипения чистой воды оказали наибольшее влияние на предполагаемый результат. Эти три параметра были использованы в качестве входных переменных для модели. Значения регрессии (R) и среднеквадратичной ошибки (MSE) были использованы для оценки эффективности модели. ANFIS показала лучшие результаты, чем MLR и ANN, с точки зрения точности прогнозирования, при значении R 0,99.

Литература

1. Erdem F. Parameter estimation in Crystal Sugar production With MLR, ANN and ANFIS // Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. – 2022. – Т. 28. – №. 7. – С. 987–992.
2. Lutska N. et al. Modeling the Productivity of a Sugar Factory using Machine Learning Methods // 2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). – IEEE, 2022. – С. 353–356.
3. Soares R.M. et al. Digital twin for monitoring of industrial multi-effect evaporation // Processes. – 2019. – Т. 7. – №. 8. – С. 537.
4. Tuzhilkin V.I. et al. Process engineering of semi-continuous boiling of massecuites based on Digital Twin of sucrose crystallization // Journal of Food Engineering. – 2024. – Vol. 365. – P. 111816. – DOI 10.1016/j.jfoodeng.2023.111816.
5. Uhlenbrock L. et al. Digital twin for extraction process design and operation // Processes. – 2020. – Т. 8. – №. 7. – С. 866.
6. Vetter F.L., Strube J. Enabling total process digital twin in sugar refining through the integration of secondary crystallization influences // Processes. – 2022. – Т. 10. – №. 2. – С. 373.
7. Warke V. et al. Sustainable Development of Smart Manufacturing Driven by the Digital Twin Framework: A Statistical Analysis. Sustainability 2021, 13, 10139. – 2021.
8. Петров, С.М. Контроль и управление кристаллизацией сахарозы в вакуум-аппаратах периодического действия / С.М. Петров, Н.М. Подгорнова // Сахар. – 2024. – № 2. – С. 40–46. – DOI 10.24412/2413–5518–2024–2–40–46.
9. Петров, С.М. Онлайн-мониторинг кристаллов при уваривании утфелей / С.М. Петров, Н.М. Подгорнова // Сахар. – 2024. – № 3. – С. 16–21. – DOI 10.24412/2413–5518–2024–3–16–21.
10. Цифровые двойники и искусственный интеллект: оптимальное решение для повышения эффективности периодического уваривания утфелей / С.М. Петров, С.Л. Филатов и др. // Сахар. – 2024. – № 1. – С. 41–47.