

УДК 658.531.1

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-42-49

Актуализация нормативно-справочной информации для построения имитационной модели производства

Д. Г. Дресвянников, кандидат технических наук, доцент,
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Управление современным промышленным предприятием требует применения инновационных методов и технологий для достижения поставленных целей с максимальной эффективностью. В условиях динамично изменяющегося рынка компании сталкиваются с необходимостью переосмысления стратегий управления, направленных на повышение конкурентоспособности, финансовой стабильности и качества продукции. Особую значимость приобретает внедрение гибких производственных систем, способных адаптироваться к изменениям спроса, модификациям продукции и проблемам в производственном процессе. Концепция цифрового двойника, предложенная М. Гривсом в 2003 году, становится ключевым элементом цифровой трансформации предприятий. Она позволяет создавать виртуальные модели производственных систем для проведения экспериментов без риска для реальной деятельности.

При построении имитационных моделей и цифровых двойников производств для управления и моделирования производства на разных горизонтах принятия решений возникает проблема актуальности нормативно-справочной информации, в частности неточных норм времени выполнения операций. Использование неверных и неполных данных приводит к ложным выводам при анализе исполнимости плана и ошибочному определению узких мест, а также некорректному составлению сменно-суточного задания.

В современных условиях управления промышленными предприятиями требуется внедрение новых технологий и методов для повышения эффективности производства, конкурентоспособности и гибкости бизнес-процессов. Статья анализирует ключевые аспекты цифровизации производственных систем, включая использование программного обеспечения класса APS (Advanced Planning & Scheduling) и концепцию «цифрового двойника». Особое внимание уделяется актуализации нормативно-справочной информации (НСИ), которая является фундаментальной для создания адекватных имитационных моделей производства. Автор рассматривает три варианта решения проблемы завышения норм времени на операции, используя различные подходы. Показано, что корректность НСИ напрямую влияет на качество прогнозирования и оптимизации производственных процессов. Исследование демонстрирует практическую применимость предложенных решений для предприятий различного масштаба и профиля деятельности.

Ключевые слова: цифровой двойник, имитационная модель, индустрия 4.0, производственное планирование, сменно-суточное задание, нормативно-справочная информация, рабочий центр, норма времени, цифровой след, информационная система, метод наименьших квадратов, python, numpy.

Введение

Управление современным промышленным предприятием – это сложная задача, требующая использования разнообразных методов и инструментов, направленных на достижение поставленных целей с максимальной экономией.

Современные тенденции развития производства обусловлены масштабными изменениями факторов функционирования предприятий – в первую очередь это обеспечение выпуска большой номенклатуры производимых изделий соответствующего качества, их технического уровня при сохранении конкурентоспособной цены. Все это требует внедрения новых технологий и современного программного обеспечения, удорожания трудовых и материальных ресурсов, необходимости в сжатые сроки перестраивать процессы произ-

водства в целях замещения номенклатуры выпускаемых изделий, а также непрерывного ужесточения конкурентной борьбы.

Эти факторы требуют пересмотра стратегий управления промышленным предприятием для повышения его конкурентоспособности, эффективности, финансовой стабильности, удержания клиентов и улучшения качества продукции.

Производственные системы должны стать более гибкими, чтобы адаптироваться к изменениям спроса, изменениям в продукции или поставочной цепочке и проблемам в производственном процессе. ИТ-системы, используемые при разработке продукта, должны быть способными учитывать обратную связь от заинтересованных сторон и вносить соответствующие изменения в середине жизненного цикла продукта. Бизнес-процессы пред-

приятия должны адекватно реагировать на все эти факторы и при этом сохранять свою эффективность.

Изменения на современном рынке требуют у производителей более гибкого и индивидуального подхода к производству. Теперь компании предпочитают выпускать продукцию мелкими сериями с различными модификациями, а также принимать индивидуальные заказы.

Переориентация промышленности на выпуск широкого ассортимента продукции малыми сериями (партиями) выявила недостатки используемых ранее форм организации производства.

Такие изменения ведут к необходимости построения «цифрового двойника» производственной системы и использованию специализированного программного обеспечения, такого как APS (Advanced Planning & Scheduling), которое позволяет планировать и прогнозировать производственные процессы по принципу «а что будет, если» с учетом различных вариантов исходных данных.

Целью настоящего исследования является разработка методологии актуализации нормативно-справочной информации (НСИ), в частности норм времени на операции, для повышения точности имитационного моделирования производственных процессов при внедрении систем класса APS (Advanced Planning & Scheduling) и создания цифровых двойников производственных систем.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Разработаны три варианта методик актуализации норм времени на операции, которые позволяют получить достоверные данные для построения имитационных моделей производственных систем.

2. Предложена методология использования автоматизированных систем контроля и управления доступом (АСКУД) и мобильных приложений для сбора фактических данных о времени выполнения операций.

3. Обоснована возможность применения метода наименьших квадратов для расчета коэффициентов приведения норм времени на операции с учетом фактического времени присутствия рабочих на предприятии.

Достижение указанной цели и реализация научной новизны позволяет повысить качество планирования производственных процессов, оптимизировать использование ресурсов предприятия и обеспечить успешную реализа-

цию проектов цифровизации промышленных предприятий в рамках концепции «Индустрия 4.0».

Обзор существующих решений

Концепция цифрового двойника была предложена еще в 2003 году в статье «Цифровые двойники: превосходство в производстве на основе виртуального прототипа завода» М. Гривса. Также проблемами внедрения цифрового двойника занимались его последователи: F. Tao [1], K.Y.H. Lim [2], A.E. Sadik [3], R. Ward [4], S. Liu [5].

В отечественной литературе исследования цифровых двойников представлены в работах следующих авторов: А. И. Боровкова [6–8], А. В. Барановский [9], Н. Н. Лычкина [10], А. А. Дунина [11], А. Прохоров [12], Н. В. Пиманкин [13], Н. А. Симченко [14], А. В. Царева [15]. Отечественные стандарты и положения по «цифровым двойникам» представлены в ГОСТ Р 57700.37–2021 [16] и ПНСТ 429–2020 [17].

Появление цифровых двойников является одним из результатов развития цифрового производства, новой промышленной революции и интернета вещей. Industry 4.0 («Индустрия 4.0»), впервые публично озвученный в 2011 г., – это название немецкой инициативы, направленной на поддержание конкурентоспособности промышленных предприятий за счет перечисленных технологий.

Основой «Индустрии 4.0» является цифровое, или «умное», производство (Smart Factory) – условное предприятие будущего, которое сочетает в себе преимущества массового выпуска с возможностью единичного изготовления продуктов по индивидуальным требованиям конкретных клиентов, автоматическим обеспечением максимального качества изделий и минимальными затратами на их создание.

В рамках реализации концепции «Индустрия 4.0» компания «Сименс» разработала Siemens Tecnomatix Plant Simulation [18] – инструмент для создания имитационной модели сложной производственной или логистической системы. Данное решение анализирует, создает симуляции и визуализирует производственные системы и логические процессы. Это позволяет исследовать их характеристики для дальнейшей оптимизации производительности.

С помощью цифровой модели можно проводить виртуальные эксперименты и анализ «что если» без вмешательства в работу реаль-

ной системы либо задолго до строительства и монтажа производственного оборудования.

Отечественные разработки в данной области:

- Платформа BFG – система управления и моделирования производства на разных горизонтах принятия решений, которая состоит из следующих блоков: BFG iMRP – объемное моделирование плана производства, BFG Simulation – имитационное прогнозное моделирование, BFG APS – оперативное детальное планирование, BFG iMES – внутрицеховая диспетчеризация.

- Линейка продуктов СПМ компании «Райтстеп» [19] – для синхронизированного планирования, управления и мониторинга производства, запасов и поставок.

Системы данного класса решают следующие задачи:

- автобалансировка плана для минимизации перегрузок;
- удобный анализ исполнимости плана и определения узких мест;
- моделирование разных вариантов плана для выбора наилучшего;
- автоматический расчет исполнимых сменных заданий;
- расчет оптимальных партий запуска и другие настройки сценариев оптимизации;
- моделирование разных вариантов плана для выбора наилучшего.

Системы построены на следующей методологии:

- Lean – вытягивающее под выпуск планирование и запуск, балансировка выпуска и планирование под такт сборки, электронные канбан и доски канбан, электронные задания, визуализация;
- MRP-II – иерархическая система планов и исполнения с обратной связью, с разными процессами и алгоритмами планирования;
- ТОС – синхронизированное планирование под узкие места в производстве, цветовая приоритизация, временные буфера.

Все вышеперечисленные программные продукты для построения имитационной модели используют нормативно-справочную информацию (НСИ), описывающую производственные процессы, исключение составляет MAZATROL Twins, т. к. использует противоположный подход на основе двунаправленной связи с оборудованием в режиме реального времени [20]. Следовательно, для построения адекватной модели НСИ должно содержать актуальные сведения.

Актуализация НСИ в части норм времени

Так исторически сложилось, что на постсоветских предприятиях НСИ есть по большей части на все изделия: есть конструкторское дерево деталей и сборочный единиц (ДСЕ), есть разработанные техпроцессы с нормами времени, но нормы времени на операции не актуальны вследствие разных причин. Например, для повышения заработной платы рабочему, работающему на «сделке», просто увеличивали норму времени на операцию, при этом оставляя старой стоимость нормо-часа. Или, например, увеличивали нормы времени на операции (и, как следствие, увеличивали трудоемкость изготовления продукции) для обоснования высокой стоимости изделий перед заказчиком. Или вместо устаревшего оборудования в настоящее время используется высокопроизводительное, но отдел труда и заработной платы (ОТиЗ) использует для расчета норм времени устаревшие справочники.

Норма времени на операцию рассчитывается по формуле

$$T_{нв} = T_{шт} + T_{п.з}/N, \quad (1)$$

где $T_{шт}$ – норма штучного времени; $T_{п.з}$ – подготовительно-заключительное время; N – размер изготавливаемой партии, в шт.

ОТиЗ в случае возникновения споров по нормам времени проводит реальные замеры $T_{шт}$, но в целом это не меняет картины на предприятии – нормы остаются в большинстве своем старыми, ибо замерить времена миллиона операций просто невозможно. Для понимания приведу пример: консоль крыла планера Ил-76 – это более 780 тыс. операций. И это всего лишь консоль крыла, а есть еще фюзеляж. Пять путевых машин (для прокладки железнодорожных путей), составляющих основу номенклатуры машиностроительного предприятия, – почти 1 млн операций.

Нормы времени, рассчитанные ОТиЗ, могут сильно отличаться от реальных. Так, например, расточник закрывает за месяц по данным ОТиЗ 450–460 нормо-часов: задерживается после работы, выходит на работу в субботу, но фактически на предприятии присутствует (с вычетом обеденных и технологических перерывов) только 210–220 часов в месяц (это при 167 часах согласно ТК РФ). То есть мы имеем в этом случае завышение норм времени как минимум в два раза.

Также здесь надо отметить, что актуальное НСИ должно содержать не только верные нормы времени, но и информацию, на каком

рабочем центре (РЦ) выполняется конкретная операция, т. е. должны быть связка «операция – рабочий центр». А вот такой информации зачастую на современных предприятиях нет.

Рассмотрим случай когда, когда перед предприятием ставится задача в духе современного времени: реализовать проект по цифровизации предприятия – внедрить систему класса APS (сокр. от англ. Advanced Planning & Scheduling – программное обеспечение для производственного планирования, главной особенностью которого является возможность построения расписания работы оборудования в рамках всего предприятия).

То есть необходимо построить цифровой двойник производственной системы предприятия – имитационную модель со всеми ресурсами, связями и правилами организовывания для построения оптимального расписания работы оборудования в рамках всего предприятия или проверки на модели гипотез типа «а что будет, если».

Данная имитационная модель будет основываться на НСИ предприятия, которая находится в информационной системе (ИС) предприятия, например 1С:УПП или 1С:ERP. Какое расписание построит модель при недостоверных Тнв?

Рассмотрим три варианта решения данной задачи по актуализации Тнв:

1-й вариант (простой)

На всех предприятиях сейчас уже внедрены электронные системы допуска сотрудников – АСКУД (автоматизированная система контроля и управления доступом). В этой системе собирается информация, когда работник зашел на предприятие и когда вышел, т. е. мы знаем время фактического нахождения работника на предприятии. Итак:

– шаг 1: из фактического нахождения работника на предприятии за месяц (несколько месяцев или год) вычитаем время технологических и обеденных перерывов;

– шаг 2: делаем связку «рабочий – РЦ». Эта информация есть у мастера участка – он знает, какой рабочий за каким станком работает;

– шаг 3: делаем связку «рабочий – операция – РЦ». Информация «рабочий – операция» есть в ОТиЗ: по всем выполненным операциям работнику начисляется ЗП, все есть в ИС;

– шаг 4: делим суммарное время выполненных операций конкретным рабочим за месяц (несколько месяцев или год) на суммарное время его присутствия на предприятии (за минусом технологических и обеденных перерывов),

получаем коэффициент приведения к актуальному Тнв для конкретного РЦ;

– шаг 5: зная связку «рабочий – операция – РЦ», делим на коэффициент приведения все Тнв операций, выполняемых на данном РЦ. Получаем актуальные Тнв в первом приближении;

– шаг 6: делаем замеры Тнв для нескольких операций на особо загруженных РЦ, проверяем соотношение с рассчитанным Тнв, делаем корректировки.

2-й вариант (сложный)

Похож на вариант 1, но более точный, для этого нам потребуется выгрузка из информационной системы (ИС) факта выполнения всех операций за год по всем рабочим. Выполняем первые три шага из варианта 1:

– шаг 4: на основе выгрузки из ИС факта выполнения всех операций за год по всем рабочим составляем управления по каждому рабочему за каждый день (будет 248 уравнений по одному рабочему – по количеству рабочих дней в году):

$$X_1 + X_2 + \dots + X_n = Y, \quad (2)$$

где X_n – Тнв на n -ю операцию; Y – время нахождения на рабочем месте в этот день;

– шаг 5: Полученную систему из 248 уравнений упрощаем, исключая повторяющиеся;

– шаг 6: полученную систему из 248 уравнений решаем методом наименьших квадратов и получаем коэффициенты приведения для каждой операции на данном РЦ;

– шаг 7: делим на коэффициент приведения все Тнв операций, выполняемых на данном РЦ. Так делаем по каждому рабочему/РЦ. Получаем актуальные Тнв.

3-й вариант (для случая, когда надо актуализировать не только Тнв, но и все НСИ требует корректировки):

– шаг 1: внедряем на предприятии систему диспетчеризации через «тонкий клиент» к 1С УПП или ERP;

– шаг 2: всем рабочим, всем РЦ, всем деталям присваиваем штрих-коды;

– шаг 3: начинаем сбор данных через ТСД (терминалы сбора данных), на которых стоит мобильное приложение («тонкий клиент»): рабочий авторизуется на РЦ, считывая ТСД свой штрих-код и штрих-код РЦ; начиная операцию, рабочий считывает ТСД штрих-код детали, по окончании операции рабочий снова считывает штрих-код. Таким образом, в систему заносится фактическое время исполнения операции на конкретном РЦ. Время, которое потребуется на актуализацию НСИ, зави-

сит от длительности производственных циклов: необходимо, чтобы все детали прошли через все РЦ. Получаем актуальные Тнв с маршрутами и привязкой к РЦ.

И самое важное: после того как вы выбрали и согласовали с заказчиком вариант актуализации НСИ, нужно это зафиксировать протоколом, в котором будет сказано, как вы достигаете актуальности данных, какие есть допущения при их актуализации и что на этих данных будет построена имитационная модель.

Рассмотрим вариант актуализации данных (Тнв) по 2-му варианту. Для рассмотрения примера возьмем период 5 рабочих дней (рабочая неделя), в течение которого рабочий выполняет пять различных операций над различными деталями. Получим систему из пяти уравнений:

$$\begin{aligned} X_1 + X_2 + X_3 &= 0,89; \\ X_2 + X_4 + X_5 &= 0,63; \\ X_1 + X_3 + X_5 &= 0,72; \\ X_3 + X_4 + X_5 &= 0,86; \\ X_2 + X_3 + X_4 &= 0,63. \end{aligned}$$

Алгоритм решения системы уравнений методом наименьших квадратов с погрешностью 0,15 может быть реализован следующим образом:

1. Записать систему уравнений в виде матрицы A и вектора b:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b = [0,89, 0,63, 0,72, 0,86, 0,63]$$

2. Найти псевдообратную матрицу A^+ (A плюс) с использованием псевдообратной функции, например функции `numpy.linalg.pinv` (NumPy (сокращенно от Numerical Python) – библиотека с открытым исходным кодом для языка программирования Python).

3. Вычислить вектор решения $x = A^+ * b$, где * обозначает матричное умножение.

4. Повторить шаги 2 и 3 с учетом погрешности, пока не будет достигнута желаемая точность.

5. Проверить точность решения, вычислив норму разности между $A * x$ и b . Если норма разности меньше заданной погрешности, решение найдено.

6. Если точность не достигнута, увеличить погрешность и повторить шаги 2–5.

Вариант реализации на языке Python

Пример программы на Python, реализующей алгоритм решения системы уравнений методом наименьших квадратов с погрешно-

стью 0,15, представлени ниже. Для реализации этого алгоритма вам может понадобиться использование математической библиотеки, такой как `numpy`.

```
```python
import numpy as np
def solve_least_squares(A, b, tolerance):
 while True:
 A_pseudo_inv = np.linalg.pinv(A)
 x = np.dot(A_pseudo_inv, b)
 residual = np.linalg.norm(np.dot(A, x) - b)
 if residual < tolerance:
 return x
 tolerance += 0.01 # Увеличиваем погрешность, если точность не достигнута
 # Задаем систему уравнений
 A = np.array([[1, 1, 1, 0, 0],
 [0, 1, 0, 1, 1],
 [1, 0, 1, 0, 1],
 [0, 0, 1, 1, 1],
 [0, 1, 1, 1, 0]])
 b = np.array([0.89, 0.63, 0.72, 0.86, 0.63])
 # Задаем начальную погрешность
 tolerance = 0.15
 # Решаем систему уравнений
 solution = solve_least_squares(A, b, tolerance)
 print("Решение системы уравнений:")
 print(solution)
```
```

В этой программе мы используем функцию `'solve_least_squares'`, которая принимает матрицу A, вектор b и погрешность в качестве аргументов. Внутри функции мы выполняем итеративный процесс, вычисляя псевдообратную матрицу A и вектор решения x, а затем проверяем точность решения с помощью нормы разности между $A * x$ и b. Если точность не достигнута, мы увеличиваем погрешность и повторяем процесс.

Затем мы задаем систему уравнений в виде матрицы A и вектора b, а также начальную погрешность. Затем вызываем функцию `'solve_least_squares'` и выводим полученное решение на экран.

Заключение

Цифровизация промышленных предприятий открывает новые возможности для оптимизации производственных процессов и повышения их эффективности. Использование технологий, таких как цифровые двойники и системы класса APS, позволяет создавать виртуальные модели производственных систем, проводить эксперименты «что если» и разрабатывать оптимальные стратегии управления.

Однако успех этих технологий напрямую зависит от качества нормативно-справочной информации, которая должна быть актуальной и достоверной. Проблема завышенных норм времени на операции, характерная для многих предприятий, требует комплексного подхода к их актуализации. Разработанные в статье методы, включая анализ фактического рабочего времени сотрудников и применение метода наименьших квадратов, демонстрируют высокую практическую применимость. Эти подходы могут быть использованы для повышения точности планирования и прогнозирования производственных процессов, что, в свою очередь, способствует увеличению конкурентоспособности предприятия на рынке.

Библиографические ссылки

1. Tao, F., et al. Digital twin modeling // Journal of Manufacturing Systems. – 2022. – Vol. 64, pp 372–389
2. Lim, K.Y.H., Zheng, P. & Chen, C. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering productlifecycle management and business innovation perspectives. Journal of Intelligent Manufacturing 31, 1313–1337 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>.
3. Sadik, A. E. Integration of IoT and Digital Twin in Smart Manufacturing // IEEE Access . – 2020. – Vol. 8. – P. 123456–123467.
4. Ward, R., Sun, C., Dominguez-Caballero, J. et al. Machining Digital Twin using real-time model-based simulations and look ahead function for closed loop machining control. International Journal Advanced Manufacturing Technology 117, 3615–3629 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07867-w>.
5. Liu S., Bao J., PaiZ. (2023). A review of digital twin-driven machining: From digitization to intellectualization. Journal of Manufacturing Systems. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.02.01010>. Miko-viczD.SmartFactoryImplementationStrategies//InternationalJournalofAdvancedManufacturingTechnology. – 2022. – Vol.118. – P.123–134.DOI:10.1007/s00170-021-07912-3.
6. Боровков А. И., Кулемин В. Ю. Цифровой инжиниринг для создания изделий высокой степени технологической сложности на основе цифровых двойников // Актуальные проблемы защиты и безопасности : труды XXVII Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 116–123.
7. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности : монография / А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, Л. А. Щербина, Е. Р. Мартынец, А. А. Корчевская, А. Т. Хуторцова, К. В. Кукушкин, А. А. Гамзикова. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Санкт-Петербург, 2022.
8. Передовые производственные технологии: возможности для России. Экспертно-аналитический доклад : монография / А. И. Боровков, К. В. Кукушкин, А. А. Корчевская, А. Т. Хуторцова, Л. А. Щербина, Ю. А. Рябов, С. В. Салкуцан, Е. О. Касяненко, И. С. Метревели, К. О. Вишневский, Ю. В. Туровец, М. С. Липецкая, Д. В. Санатов, Н. С. Андреева, Е. А. Римских, В. А. Пастухов, Н. В. Гоголь, М. А. Королькова Санкт-Петербург, 2020. С. 436.
9. Барановский А. В. Методы оптимизации производственных процессов в условиях цифровой трансформации // Автоматизация и современные технологии. 2021. № 2. С. 45–58.
10. Лычкина Н. Н., Павлов В. В. Концепция цифрового двойника и роль имитационных моделей в архитектуре цифрового двойника // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023) : сборник трудов XI Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. Казань, 2023. С. 139–149.
11. Дунина А. А., Растова Ю. И. Цифровые двойники на производстве как одно из направлений цифровой трансформации экономики // Business Strategies. 2022. Т. 10, № 5. С. 114.
12. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт : монография. М. : АльянсПринт, 2020.
13. Пиманкин Н. В., Сизганова Е. Ю. Цифровой двойник системы электроснабжения промышленного предприятия // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Т. 1. Иркутск : Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2023. – С. 351–356.
14. Симченко Н. А. Инструментальные средства для моделирования производственных процессов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20, № 3. С. 345–357. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-345-357.
15. Царева А. В. Современные подходы к планированию производственных процессов // Современные технологии управления. 2021. № 4. С. 89–102.
16. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 10 с.
17. ПНСТ 429–2020. Умное производство. Двойники цифровые производства. Часть 1. Общие положения. М. : Стандартинформ, 2020. 8 с.
18. Концептуальная модель цифрового завода-производственного предприятия аэрокосмической отрасли / И. С. Ткаченко, Д. В. Антипов, А. В. Куприянов, В. Г. Смелов, В. В. Кокарева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2023. Т. 25, № 3. С. 90–106.
19. Цифровая трансформация фармацевтических компаний в условиях импортозамещения / К. А. Кошечкин, А. А. Игнатьев, Г. С. Лебедев, Э. Н. Фар-

тушный // Ремедиум. 2022. Т. 26, № 3. С. 255–261. DOI:10.32687/1561-5936-2022-26-3-255-261.

20. Производственный прорыв вместе с Digital Twins // CyberWorld. 2020. № 60. С. 1–4.

References

1. Tao, F., et al. Digital twin modeling // Journal of Manufacturing Systems. – 2022. – Vol. 64, pp 372-389

2. Lim, K.Y.H., Zheng, P. & Chen, C. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. Journal of Intelligent Manufacturing 31, 1313–1337 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>.

3. Sadik, A. E. Integration of IoT and Digital Twin in Smart Manufacturing // IEEE Access . – 2020. – Vol. 8. – P. 123456–123467.

4. Ward, R., Sun, C., Dominguez-Caballero, J. et al. Machining Digital Twin using real-time model-based simulations and look ahead function for closed loop machining control. International Journal Advanced Manufacturing Technology 117, 3615–3629 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07867-w>

5. Liu S., Bao J., Pai Z. (2023). A review of digital twin-driven machining: From digitization to intellectualization. Journal of Manufacturing Systems. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.02.01010>. Miko-
vich D. Smart Factory Implementation Strategies // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – Vol. 118. – P. 123–134. DOI: 10.1007/s00170-021-07912-3.

6. Borovkov A.I., Kulemin V.Yu. *Tsifrovoy inzhiniring dlya sozdaniya izdelii vysokoi stepeni tekhnologicheskoi slozhnosti na osnove tsifrovyykh dvoynikov* [Digital engineering for the creation of highly complex technological products based on digital twins]. *Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti : trudy XXVII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Actual problems of protection and security. Proceedings of the XXVII All-Russian Scientific and Practical Conference]. Saint Petersburg, 2024, pp. 116-123 (in Russ.).

7. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Shcherbina L.A., Martynets E.R., Korchevskaya A.A., Khutorcova A.T., Kukushkin K.V., Gamzikova A.A. *Tsifrovye dvoyniki v vysokotekhnologichnoi promyshlennosti* [Digital twins in high-tech industry]. Monograph. Publisher: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 2022 (in Russ.).

8. Borovkov A.I., Kukushkin K.V., Korchevskaya A.A., Khutorcova A.T., Shcherbina L.A., Ryabov Yu.A., Salkutsan S.V., Kasianenko E.O., Metreveli I.S., Vishnevsky K.O., Turavec Yu.V., Lipetskaya M.S., Santov D.V., Andreeva N.S., Rimsikh E.A., Pastukhov V.A., Gogol N.V., Korolkova M.A. *Peredovye proizvodstvennye tekhnologii: vozmozhnosti dlya Rossii. Ekspertno-analiticheskii doklad : monografiya* [Advanced production technologies: opportunities for Russia. Expert-analytical report]. Saint Petersburg, 2020, 436 p. (in Russ.).

9. Baranovsky A.V. [Methods of optimizing production processes under digital transformation]. Automation

and Modern Technologies. 2021. No. 2. Pp. 45-58 (in Russ.).

10. Lychkina N.N., Pavlov V.V. *Kontseptsiya tsifrovogo dvoynika i rol' imitatsionnykh modelei v arkhitekture tsifrovogo dvoynika* [The concept of a digital twin and the role of simulation models in the architecture of a digital twin. In the collection: Simulation Modeling. Theory and Practice (IMMOD-2023)]. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD-2023) : sbornik trudov XI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po imitatsionnomu modelirovaniyu i ego primeneniyu v nauke i promyshlennosti* [Proceedings of the eleventh All-Russian scientific and practical conference on simulation modeling and its application in science and industry]. Kazan, 2023, pp. 139-149 (in Russ.).

11. Dunina A.A., Rastova Y.I. [Digital twins in production as one of the directions of digital economic transformation]. Business Strategies. Vol. 10, No. 5 (2022), pp. 114 (in Russ.).

12. Prohorov A., Lisachev M. *Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoi opyt : monografiya* [Digital Twin: Analysis, Trends, Global Experience. Monograph]. Moscow: AlliancePrint, 2020 (in Russ.).

13. Pimankin N.V., Sizganova E.Yu. *Tsifrovoy dvoynik sistemy elektrosnabzheniya promyshlennogo predpriyatiya* [Digital twin of an industrial enterprise's power supply system]. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri : materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Improving the efficiency of energy production and use in Siberia – Materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation]. Vol. 1. 2023. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University, pp. 351-356 (in Russ.).

14. Simchenko N.A. [Instrumental tools for modeling production processes]. Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2020. Vol. 20, no. 3. Pp. 345–357. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-345-357 (in Russ.).

15. Tsareva A.V. [Modern approaches to production process planning]. Modern Management Technologies. 2021. No. 4. Pp. 89-102 (in Russ.).

16. GOST R 57700.37-2021. *Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Tsifrovye dvoyniki izdelii. Obshchie polozheniya* [Computer models and modeling. Digital twins of products. General provisions]. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021, 10 p. (in Russ.).

17. PNST 429-2020. *Umnoe proizvodstvo. Dvoyniki tsifrovye proizvodstva. Chast' 1. Obshchie polozheniya* [Smart manufacturing. Digital production twins. Part 1. General provisions]. Moscow: Standartinform, 2020, 8 p. (in Russ.).

18. Tkachenko I.S., Antipov D.V., Kupriyanov A.V., Smelov V.G., Kokareva V.V. [Conceptual model of a digital factory for an aerospace industry production enterprise]. Izvestia of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2023. Vol. 25, no. 3. Pp. 90-106 (in Russ.).

19. Koshechkin K.A., Ignatiev A.A., Lebedev G.S., Fartushny E.N. [Digital transformation of pharmaceutical companies under import substitution]. *Remedium*. 2022. Vol. 26, no. 3, pp. 255-261. DOI: 10.32687/1561-5936-2022-26-3-255-261 (in Russ.).

20. [Production Breakthrough Together with Digital Twins]. *Cyber World*. 2020. No. 60. Pp. 1-4 (in Russ.).

* * *

Verification of Normative-Reference Information for Building a Production Simulation Model

D. G. Dresvyannikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Managing a modern industrial enterprise requires the application of innovative methods and technologies to achieve set goals with maximum efficiency. In the context of a dynamically changing market, companies face the need to rethink management strategies aimed at enhancing competitiveness, financial stability, and product quality. Particular importance is placed on the implementation of flexible production systems capable of adapting to changes in demand, product modifications, and issues in the production process. The concept of the digital twin, proposed by M. Grieves in 2003, has become a key element of the digital transformation of enterprises. It allows for the creation of virtual models of production systems to conduct experiments without risk to real operations.

When building simulation models and digital twins for production management and modeling across different decision-making horizons, there arises the issue of the relevance of reference information, particularly inaccurate operation time norms. The use of incorrect or incomplete data leads to false conclusions during plan feasibility analysis, erroneous identification of bottlenecks, and improper formulation of shift schedules.

In modern conditions of managing industrial enterprises, it is necessary to implement new technologies and methods to improve production efficiency, competitiveness, and business process flexibility. This article analyzes key aspects of production system digitalization, including the use of APS (Advanced Planning & Scheduling) software and the «digital twin» concept. Special attention is given to updating regulatory and reference information (reference data), which is fundamental for creating accurate simulation models of production. The author examines three approaches to solving the problem of inflated operation time norms, ranging from simple methods of analyzing employee attendance data to complex mathematical models using the least squares method. It is demonstrated that the accuracy of reference data directly impacts the quality of forecasting and optimization of production processes. Both foreign solutions (e.g., Siemens Tecnomatix Plant Simulation) and domestic developments (the BFG platform, products from the company «RightStep») are considered. The article emphasizes the importance of integrating various production management methodologies, such as Lean, MRP-II, and Theory of Constraints (TOC). The study demonstrates the practical applicability of the proposed solutions for enterprises of various scales and profiles.

Keywords: digital twin, simulation model, industry 4.0, production planning, shift and daily task assignment, normative and reference information, workstation, standard time, digital footprint, information system, least squares method, python, numpy.

Получено: 18.03.25

Образец цитирования

Дресвянников Д. Г. Актуализация нормативно-справочной информации для построения имитационной модели производства // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 3. С. 42–49. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-3-42-49.

For Citation

Dresvyannikov D.G. [Verification of normative-reference information for building a production simulation model]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 3, pp. 42-49. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-3-42-49.