УДК 658.5.012.1

DOI 10.26118/2782-4586.2025.32.94.036

Коротеев Тарас Иванович

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Методика внедрения концептуальной модели системы организации цифрового производства машиностроительных изделий на основе внедрения сквозных технологий (цифровых двойников)

Аннотация. В статье представлена методология внедрения концептуальной модели системы организации цифрового производства машиностроительных изделий на основе сквозных технологий, включая применение цифровых двойников. Предложен системный подход к оптимизации производственных конфигураций с учетом сложных вариативных точек, сценариев и параметров, что позволяет более точно учитывать изменчивость объектов на разных уровнях планирования и управления. Описан процесс создания архива конфигураций с ключевыми показателями эффективности (KPI), обеспечивающий основу для интерактивного и адаптивного планирования производства. Особое внимание уделено этапам подготовки, анализа текущего состояния предприятия, выбора KPI, разработки и тестирования модели, а также ее практического внедрения. Результаты исследования демонстрируют значительное повышение гибкости и эффективности производственной системы за счет снижения трудозатрат, минимизации ошибок и оптимизации материальных и информационных потоков. Представленная методология может быть использована промышленными предприятиями для успешной трансформации в условиях цифровой экономики.

Ключевые слова: моделирование, цифровой двойник, расчет, KPI, оптимизация, производственные системы, концептуальная модель, сквозные технологии.

Koroteev Taras Ivanovich

Moscow State Technological University "STANKIN"

The methodology of implementation of the conceptual model of the system of organization of digital production of machine-building products based on the introduction of end-to-end technologies (digital twins)

Abstract. The article presents a methodology for implementing a conceptual model of a system for organizing the digital production of machine-building products based on end-to-end technologies, including the use of digital twins. A systematic approach to optimizing production configurations is proposed, taking into account complex variable points, scenarios and parameters, which makes it possible to more accurately account for the variability of facilities at different levels of planning and management. The process of creating an archive of configurations with key performance indicators (KPIs), which provides the basis for interactive and adaptive production planning, is described. Special attention is paid to the stages of preparation, analysis of the current state of the enterprise, selection of KPIs, development and testing of the model, as well as its practical implementation. The research results demonstrate a significant increase in the flexibility and efficiency of the production system by reducing labor costs, minimizing errors, and optimizing material and information flows. The presented methodology can be used by industrial enterprises for successful transformation in the digital economy.

Keywords: modeling, digital twin, calculation, KPI, optimization, production systems, conceptual model, end-to-end technologies.

Методика внедрения концептуальной модели системы организации цифрового производства машиностроительных изделий на основе внедрения сквозных технологий (СОЦПМИ ОВСТ) базируется на исследовании основных функций, связанных с реализацией, эксплуатацией и развитием предложенной системы [1, 3, 5, 6]. В рамках методики внедрения концептуальной модели разработана последовательность действий, охватывающая все этапы создания СОЦПМИ ОВСТ - от анализа текущего состояния производства до практического внедрения и эксплуатации системы в производстве. Методика состоит из 6 этапов. Последовательность этапов внедрения концептуальной модели (КМ) приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Последовательность внедрения КМ СОЦПМИ ОВСТ

Этап	Содержание этапов внедрения КМ СОЦПМИ ОВСТ	Используемый инструментарий для проведения внедрения
Этап 1 Подготовка к созданию концептуальной модели системы организации цифрового производства машиностроительных изделий на основе внедрения сквозных технологий	Определение целей внедрения Формирование проектной команды (рабочей группы) Анализ современных подходов к внедрению элементов цифровизации Выбор критериев для оценки эффективности системы	Информационные системы промышленного предприятия Бизнес аналитика Промышленный интернет вещей (IoT платформы)
Этап 2 Анализ текущей ситуации на промышленном предприятии	Проведение аудита имеющихся производственных процессов Оценка уровня цифровизации предприятия Определение требований к системе	Информационные системы промышленного SWOT-анализ Языки моделирования
Этап 3 Выбор ключевых показателей системы организации цифрового производства машиностроительных изделий на основе внедрения сквозных технологий	Определение KPI для оценки эффективности системы Формирование экспериментального цифрового двойника с набором моделей сценариев и расчетов выбранных KPI	AnyLogic, MatLab, Simulink – для моделирования Python – для анализа данных Инструментарий для визуализации KPI
Этап 4 Разработка модели системы организации цифрового производства машиностроительных изделий на основе внедрения сквозных технологий	Разработка механизма параметризации вариаций цифровых двойников Создание системы управления изменяемостью Разработка модуля оптимизации конфигураций Определение ограничений для выявления недопустимых состояний системы	Simulink (подсистема вариантов) для параметризации. Modelica – для описания изменчивости Frontier для аналитической оптимизации
Этап 5 Проведение настроек системы организации цифрового производства	Настройка модели Тестирование модели Валидация модели Обучение сотрудников	AnyLogic, MatLab, Simulink – для моделирования Python – для анализа

Этап	Содержание этапов внедрения КМ СОЦПМИ ОВСТ	Используемый инструментарий для проведения внедрения
машиностроительных изделий на основе внедрения сквозных технологий, тестирования и валидации модели		IoT платформы для сбора данных Информационные системы промышленного предприятия
Этап 6 Внедрение системы организации цифрового производства машиностроительных изделий на основе внедрения сквозных технологий в производство	Реализация пилотного проекта Масштабирование системы Оценка результатов Поддержка развития системы	Цифровые двойники IoT платформы для сбора данных Информационные системы промышленного предприятия

На первом этапе осуществляется подготовка к созданию КМ СОЦПМИ ОВСТ. На этом этапе происходит анализ современных подходов к внедрению элементов цифровизации, определяются и формируются цели внедрения КМ СОЦПМИ ОВСТ. Этот этап является отправной точкой для следующих этапов, так как исходя из сформированных целей зависит дальнейший вид системы организации цифрового производства.

На данном этапе происходит формирование рабочей группы проекта внедрения КМ СОЦПМИ ОВСТ. Рабочая группа состоит из сотрудников подразделений предприятия, таких как экономический отдел, планово-диспетчерский отдел, технологический отдел, отдел цифровой трансформации и конструкторский отдел. Руководителем рабочей группы (лицом, принимающим решение) назначается лицо, управляющее производственными процессами на предприятии. Рабочая группа проекта занимается созданием модели, а также сбором и обработкой информации о ключевых показателях эффективности процесса внедрения.

Завершающим шагом на первом этапе внедрения СОЦПМИ ОВСТ является выбор критериев для оценивания эффективности внедрения и эксплуатации системы.

На втором этапе проводится сбор и обработка информации об имеющейся на предприятии ситуации. В ходе проведения аудита предприятия формируется база исходных данных для создания модели СОЦПМИ ОВСТ. Также на этом этапе осуществляются проверки по оцениванию цифровой зрелости предприятия и проводится оценка уровня цифровизации предприятия в целом [7].

На основании проведенных исследований текущей ситуации на предприятии, разрабатывается дорожная карта, в которой отражаются реперные точки, достижение которых является обязательным в процессе внедрения СОЦПМИ ОВСТ.

По итогам проведенного анализа и по результатам формирования дорожной карты, рабочая группа определяет требования к системе, которые должны быть отражены в концептуальной модели СОЦПМИ ОВСТ на практике.

Третий этап заключается в формировании перечня ключевых показателей, достижение которых является необходимым и достаточным результатом внедрения СОЦПМИ ОВСТ.

Рабочая группа определяет качественные и количественные показатели, используя которые можно провести оценку результатов внедрения СОЦПМИ ОВСТ.

Качественные и количественные показатели, являющиеся базовыми для СОЦПМИ ОВСТ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Показатели оценки эффективности внедрения СОЦПМИ ОВСТ

№ п/п	Показатель	Как рассчитывается	Примечание
1	Качественные показатели		
1.1	Уровень цифровой зрелости	Методом сравнительного анализа достигнутых показателей относительно имевшихся до внедрения системы	Оценка цифровой зрелости как один из показателей эффективности проведения цифровизации.
1.2	Гибкость производства [2]	Путем оценивания времени переналадки оборудования на производство новой продукции	Использование цифровых двойников для проведения имитационного моделирования с системой поддержки и принятия решений позволяет обеспечить реализуемость требований к гибкости производства
1.3	Надежность оборудования	Анализом выявляемых в процессе производства отказов у оборудования и получения уведомлений о необходимости проведения ППР.	Использование датчиковой аппаратуры, и промышленного интернета вещей положительно сказывается на надежности оборудования, сводя к минимуму его отказы.
1.4	Качество принятия решений	Метод анкетирования и опросов.	Собрав опросные листы с руководителей и сотрудников, относительно внедряемых информационных систем и их взаимодействия в рамках СОЦПМИ ОВСТ
1.5	Наличие единого информационного пространства	Проверкой взаимодействия различных информационных систем. Оценкой возможности передачи данных между системами без потерь.	Создание единого информационного пространства позволяет интегрировать различные цифровые решения.
2	Количественные показатели		
2.1	Выработка (В)	$B = \frac{BP}{\text{Ч}_{\text{СП}}}$	Отражает количество продукции, произведенной в единицу рабочего времени или приходящееся на одного среднесписочного работника в месяц, квартал, год.
2.2	Трудоемкость (Т _Е)	$T_E = \frac{T}{BP}$	Характеризует затраты труда на производство единицы продукции.
2.3	Коэффициент оборачиваемости	$K_{\text{Об}} = \frac{BP}{\text{ОБС}}$	Показывает, сколько оборотов совершили оборотные средства за

№ п/п	Показатель	Как рассчитывается	Примечание
	оборотных средств (К _{ОБ})		анализируемый период (квартал, полугодие, год)
2.4	Коэффициент закрепления оборотных средств (К _{ЗО})	$K_{ZO} = \frac{OBC}{BP}$	Характеризует сумму оборотных средств, приходящихся на 1 руб. выручки от реализации.
2.5	Длительность одного оборота (Д)	$D = \frac{F}{K_{OБ}} = \frac{F * OBC}{B}$	Показывает какой срок к предприятию возвращаются его оборотные средства в виде выручки от реализации продукции.
2.6	Материалоемкость продукции (М _Е)	$M_E = \frac{MЗ}{BP}$	Характеризует суммарный расход всех материальных ресурсов на производство единичной продукции
2.7	Материалоотдача (М _О)	$M_O = \frac{BP}{MЗ}$	Отражает количество производственной продукции в расчете на 1 руб. материальных ресурсов.
2.8	Фондоотдача (Ф _О)	$F_O = \frac{BP}{OF}$	Отражает количество производственной продукции в расчете на 1 руб. основных производственных фондов.
2.9	Фондоемкость (Ф)	$F = \frac{OF}{BP}$	Отражает стоимость основных производственных фондов в расчете на 1 руб. реализованной продукции.
2.10	Фондовооруженность труда (Ф _В)	$F_B = \frac{OF}{T}$	Характеризует оснащенность работников предприятия основными производственными фондами.
2.11	Коэффициент интенсивности использования оборудования (К _{ИНТ})	$K_{INT} = \frac{ПФ}{ПВ}$	Характеризует эффективность использования оборудования.
2.12	Рентабельность продукции (Р _{ПРОД.}) [4]	$P_{PROD.} = \frac{ПР}{C_P}$	Эффективность затрат, произведённых предприятием на производство и реализацию продукции
2.13	Рентабельность производства общая (Р _П)	$P_{II} = \frac{\Pi}{(OF\Pi + HOC)}$	Характеризует прибыльность (убыточность) производственной деятельности предприятия за определенный период времени (год, квартал)
2.14	Рентабельность продаж (оборота) (Р _Р)	$P_P = \frac{ПР}{V_P}$	Показывает, какую прибыль имеет предприятие с каждого

№ п/п	Показатель	Как рассчитывается	Примечание
			рубля реализованной продукции.
2.15	Рентабельность имущества предприятия (активов) (P_A)	$P_A = \left(\frac{\Pi}{A_C} \right) * 100$	Показывает, какую прибыль получает предприятие с каждого рубля, вложенного в активы.
2.16	Рентабельность собственного капитала (P_K)	$P_K = \frac{\Pi}{K_C}$	Показывает эффективность использования средств, принадлежащих собственникам предприятия. Служит основным критерием при оценке уровня котировки акций на бирже.
<p>Примечание:</p> <p>ВП – объём продукции или выполненной работы в натуральных либо условно - натуральных единицах;</p> <p>Ч_{СП} – среднесписочная численность работающих, чел;</p> <p>Т – время, затраченное на производство всех продукции, нормо-часы;</p> <p>ОБС – среднегодовой остаток оборотных средств на предприятии за год, ден. ед.;</p> <p>F – продолжительность календарного периода, дни;</p> <p>К_{ОБ} – коэффициент оборачиваемости за период F;</p> <p>В – выручка от реализации (объём реализованной продукции), руб.;</p> <p>МЗ – материальные затраты, ден. ед.;</p> <p>ОФ – стоимость основных производственных фондов, ден. ед.;</p> <p>Т – среднесписочная численность работающих (при расчете ФВ);</p> <p>П_Ф – фактическая производительность основанного технологического оборудования (ед. продукции/час);</p> <p>П_В – технически обоснованная производительность машин и оборудования (ед. продукции/час)</p> <p>П_Р – прибыль от реализации продуктов (работ, услуг);</p> <p>С_Р – полная себестоимость реализованной продукции;</p> <p>П – общая (валовая) прибыль за год (или другой период);</p> <p>ОФП – среднегодовая стоимость основных производственных фондов;</p> <p>НОС – среднегодовой остаток нормируемых оборотных средств;</p> <p>В_Р – стоимость реализованной продукции;</p> <p>А_С – средний объём активов;</p> <p>К_С – собственный капитал, величина которого принимается по данным баланса и равна сумме активов за минусом долговых обязательств.</p>			

На четвертом этапе принимается решение о разработке СОЦПМИ ОВСТ и разрабатывается модель системы. В зависимости от требований к системе, разрабатывается модель СОЦПМИ ОВСТ и определяется форма ее реализации. В рамках исследования предложена модель СОЦПМИ ОВСТ, учитывающая применение имитационного моделирования в экспериментальных цифровых двойниках с системой поддержки и принятия решений [8]. После разработки модели СОЦПМИ ОВСТ и установления формы ее реализации устанавливается дорожная карта ее внедрения на производство.

Пятый этап включает в себя проведения настроек модели системы, ее тестирование и валидацию. При этом при настройке модели рабочая группа адаптирует параметры под требования, обозначенные на предыдущих этапах. В ходе проведения имитационного

моделирования, проходит проверка функционирования и работоспособности системы и осуществляется ее оценка на предмет соответствия реальным данным.

В случае прохождения валидации, рабочая группа оформляет соответствующие документы, подтверждающие прохождения тестирований и валидация и пригодность СОЦПМИ ОВСТ к внедрению.

Шестой этап – внедрение СОЦПМИ ОВСТ. Для проведения внедрения рабочей группой оформляется и выпускается приказ о внедрении системы, а также оформляется акт о внедрении системы.

После запуска СОЦПМИ ОВСТ в эксплуатацию рабочая группа осуществляет мониторинг функционирования системы, выявляет проблемы и формирует отчет о неисправностях. Оценка эффективности работы СОЦПМИ ОВСТ проводится рабочей группой проекта в соответствии с критериями эффективности эксплуатации системы.

Список источников

1. Никищечкин П. А. и др. Разработка типовых архитектур цифровых двойников производственно-логистических систем машиностроительных предприятий на разных стадиях их жизненного цикла / П.А. Никищечкин, В.А. Долгов, С.Н. Григорьев // Известия вузов. Машиностроение. – 2023. – №5. – С. 758. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-5-37-48>
2. Чаруйская М.А. Исследование взаимосвязи конкурентной стратегии, технологической стратегии и системы планирования и управления производством / М.А. Чаруйская // Экономика и предпринимательство. – 2016. – №12. – ч.1. 77-1. – С. 405-409
3. Чаруйская, М. А. Развитие систем планирования и управления производством на основании конкурентной и технологической стратегий компании / М. А. Чаруйская // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2016. – № 12(94). – С. 69. – EDN XUWQVH.
4. Чаруйская М. А. Разработка организационно-экономического механизма оперативного планирования на промышленных предприятиях с комбинированным типом производства: диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Чаруйская Марианна Александровна, 2018. – 176 с. – EDN KVQFRJ.
5. Cimino . et al. Review of digital twin applications in manufacturing / C. Cimino, E. Negri, L. Fumagalli // Comput. Ind. –2019. –V. 113. P. 103130 doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>
6. Fu, Y. et al. Digital Twin for Integration of Design-Manufacturing-Maintenance: An Overview / Y. Fu, G. Zhu, M. Zhu // Chin. J. Mech. Eng. – 2022. – V. 35. P. 80. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00760-x>
7. Hao Z. et al. A digital twin-based approach for designing and multiobjective optimization of hollow glass production line / Z. Hao, L. Qiang, C. Xin // IEEE Access. –2017. – V. 5. P. 26901-26911. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2766453>
8. Tao F. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data / J. Cheng, Q. Qi, M Zhang, H. Zhang, F. Sui // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. –2017. –V. 94. –№ 9. –P. 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>

Сведения об авторе

Коротеев Тарас Иванович, аспирант, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

Information about the author

Koroteev Taras Ivanovich, Postgraduate student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow, Russia