

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ (ДВОЙНИКА)
МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ**
Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Колчин П.В.

Ключевые слова: механообрабатывающее предприятие, искусственный интеллект, кибер-физической системы, цифровые двойники.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы разработки и использования цифровых моделей (двойников) предприятия, его отдельных элементов, а также их взаимодействие. Разработаны цифровые двойники изделия, оборудования, сырья, потребителя и другие. «Цифровой двойник» механообрабатывающего производства позволяет планировать покупку нового технологического оборудования, модернизацию существующего, либо изменение технологических процессов.

**DEVELOPMENT OF A DIGITAL MODEL (TWIN) MECHANICAL-
PROCESSING ENTERPRISE**

Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Anosov M.S., Kolchin P.V.

Keywords: didital twin, mechanical processing enterprise, artificial intelligence, artificial neural networks, cyber-physical system.

Abstract. It addresses the development and use of digital models (twins) of the enterprise. Tool for rubber, roughness, dynamic condition and tool wear. The “digital twin” of the machining production allows you to plan the purchase of new technological equipment or the modernization of existing or changes in technological processes, and, very importantly, without interfering with the work of the actual process.

Цифровой двойник (didital twin) новое слово в разработке оборудования, техпроцессов и планировании производств [1,2].

Лидером в области использования "цифровых двойников" является компания Siemens [1]. Согласно его определению, "цифровым двойником" является ансамбль (цепочка) математических моделей, характеризующих различные состояния оборудования, технологических и бизнес процессов во времени, в соответствии с текущими производственными условиями.

Получение "цифровых двойников" возможно, как с использованием традиционных аналитических (например, численных) методов моделирования, основываясь на математическом описании физических процессов, так и с использованием современных статистических методов, в том числе на основе нейронно-сетового моделирования и машинного обучения.

Среди математических моделей при разработке "цифрового двойника" нейросетевые модели занимают особое место, т.к. используют большие данные и машинное обучение. Следовательно, нейросетевая модель - есть "цифровой двойник". Понятие "цифровой двойник" лишь уточняет физическую сущность нейросетевых моделей с использованием интернета вещей и облачных технологий.

Известно большое множество методов машинного обучения [3], используемых для построения статистических моделей, однако их можно отнести к трем основным группам: регрессионный анализ, классификация и выявление аномалий.

Выбор конкретного метода машинного обучения зависит от размера, качества и природы данных, а также от типа решаемых задач. Так, в случае необходимости определения количественного значения целевой переменной, предсказания её будущего значения, используются методы регрессионного анализа.

Существующие методы машинного обучения [3] требуют различных вычислительных мощностей и обладают различной степенью точности. Как правило, это сводится к возможности наиболее точной аппроксимации данных и выявлению границ в пространстве данных. Нейронные сети используют большое количество параметров настройки, что позволяет создавать высокоточные модели процессов, работающих в режимах регрессионного анализа, классификации и выявления аномалий.

В качестве основного метода [4-6], используемого для анализа качества получаемых моделей используют перекрестную проверку (Cross Validation). Перекрестная проверка позволяет оценить статистическое качество исходных данных, за счет построения и сравнения нескольких моделей полученных на различных обучающих и проверочных выборках. При построении моделей сложных объектов и систем, требуется снижение размерности данных и устранение эффекта мультиколлинеарности переменных. Решение данных задач возможно за счет применения метода главных компонент, позволяющего зачастую представить многомерные данные в виде двух составляющих. Такой обобщающий подход может применяться и для устранения переобучения моделей.

Для повышения качества модели используют [7,8] алгоритмы Бэггинга (Bagging) и Бустинга (Boosting), суть которых заключается в построении не одной модели, а целого ансамбля моделей, работающего над одной и той же задачей, а результатом их работы является некая интегральная оценка вероятности какого-либо события. Данная оценка может быть представлена как синергетический эффект работы группы моделей, каждая из которых по отдельности работает неудовлетворительно.

Использование "цифровых двойников" на основе нейронносетевых моделей, требует пересмотра устоявшихся подходов в организации и управлении современным машиностроительным предприятием. Принципиальным отличием является возможность более точного планирования и оптимизации производственных программ с учетом технических и технологических ресурсов предприятия, а также повышения гибкости производства и снижения рисков за счет высокоточного моделирования на различных масштабах.

Для выявления основных направлений использования цифровых двойников, необходим системный анализ модели типового предприятия,

существующего в условиях свободного рынка и нацеленного на удовлетворение потребностей потребителя и получения прибыли.

Модель функционирования предприятия в виде структурной схемы представлена на рис. 1.

Как видно из рис.1, модель предприятия является многомерной открытой динамически развивающейся системой с многочисленными обратными связями, осуществляющей обмен информацией с окружающей средой, т.е. синергетической системой.

Входным сигналом данной системы является вектор X характеризующий потребности клиентов в определенном количестве продукции с заданным качеством и функциональными возможностями. Параметры вектора X определяются исходя из результатов маркетинговых исследований, прогнозирования будущего спроса на данные изделия, имеющихся заказов и представленных технических заданий.



Рис. 1. Структурная схема функционирования механообрабатывающего предприятия и его взаимодействия с потребителем

Вектор E характеризует степень удовлетворенности клиентов в данной продукции и рассчитывается как разность существующих потребностей и фактического насыщения рынка данной продукцией. Вектор E является входным сигналом для звена планирования производства.

Звено планирования на основе значений вектора E вырабатывает параметры производственной программы, являющейся по своей сути задающим воздействием для этапа подготовки производства. Вектор параметров производственной программы P содержит информацию о количестве выпуска изделий, суточном темпе, себестоимости операций и деталей, потребность в исходном сырье, инструменте и т.д. Формирование данного вектора происходит с учетом естественных ограничений по производственным мощностям предприятия. Оценка производственных мощностей производится с использованием разработанных нормативных баз предприятия. Данная база представляет собой комплекс нормативной документации по использованию финансовых, материальных и трудовых

ресурсов. При этом особенно выделяют техническое нормирование, которое является одним из важнейших элементов организации производства.

Первичными операционными данными цифровых производств [2] является документация на технологические процессы с директивными нормативами трудоемкости механообработки, нормами расхода сырья для изготовления серийных изделий. Нормирование позволяет ответить на ключевые вопросы производственной деятельности: как, *когда и сколько ресурсов* (трудовых, материальных и временных) будет использовано при выпуске продукции? Оно непосредственно влияет на структуру себестоимости (ценообразование) выпускаемых изделий, ритмичность производства (сроки исполнения контрактов), управляемость персоналом, а также косвенно определяет качество продукции за счет сбалансированной интенсивности работ.

Основной задачей на данном этапе, в этой связи, является выявление и использование производственных резервов, снижение себестоимости продукции за счет оптимизации технологических цепочек, а также повышение эффективности использования производственных мощностей.

Как правило, на предприятии параметры технико-экономических норм постоянно уточняются после завершения каждого акта производственного цикла. Данной корректировкой занимается служба главного технолога, исходя из собственных наблюдений, используя личный опыт и справочные данные. При этом разработанные нормы могут быть недостаточно адекватны для данного производства из-за человеческого фактора и отсутствия систематизации всей доступной информации о производственных мощностях. В свою очередь, это вызывает определенные риски при планировании производства, оказывающие значительное влияние на себестоимость продукции, а значит и на конкурентную способность предприятия в целом.

При подготовке производственной программы (ПП) необходимо соблюдать определенную гибкость и учитывать возможность некоторых отклонений, поэтому, как правило, ПП формируется на определенные интервалы времени: на год, на месяц и на несколько дней. ПП рассчитанные на несколько дней являются “жесткой закладкой” и не должна подвергаться корректировкам. ПП, рассчитанные на несколько месяцев или лет, могут корректироваться в соответствии с различными внешними факторами, при этом каждый раз происходит оценка производственных мощностей с учетом выработанных норм.

Разработанная с учетом ограничений по производственным мощностям производственная программа характеризуется вектором P , являющимся задающим воздействием для звена конструкторско-технологической подготовки производства. На данном этапе значения вектора P преобразуются в управляющие воздействие U которое можно интерпретировать, как технологию изготовления продукции. Данный вектор несет информацию о всех технологических цепочках, рабочих процессах и режимах обработки. При этом необходимо учитывать возможности

оборудования, его текущее и будущее техническое состояние. Данные ограничения характеризуются Вектором S . Как правило, формирование значений вектора S происходит на основе опыта эксплуатации оборудования, статистики его отказов и технического обслуживания. Основной структурной единицей предприятия, формирующей значения вектора S является служба главного механика. Таким образом, передаточная функция звена конструкторско-технологической подготовки, представляет собой своеобразный регулятор, вырабатывающий управляющие воздействия для группы оборудования, объединяющиеся в цеха и участки. В итоге на основе значений вектора U , полученное со склада сырье и инструмент (вектор T) преобразуются в готовую продукцию, характеризующуюся вектором Y . Основными значениями данного вектора является: количество продукции, качество, функциональные возможности, скорость производства, себестоимости и т.д. Вектор Y является входом для звена конечных потребителей, а также сигналом обратной связи для предприятия. Обратная связь по своей сути, корректируют спрос потребителей на данную продукцию, что в свою очередь вносит изменения в производственную программу.

Исходя из вышеизложенного, можно определить и основные “цифровые двойники” механообрабатывающего предприятия - это “цифровые двойники” оборудования, технологических процессов, логистики поставщиков, складских запасов, жизненного цикла изделий и “цифровые двойники” потребителей.

Учитывая, что большинство компаний, занимающихся разработкой высокотехнологичной продукции, используют подход SCRUM в управлении проектами, основанный на непрерывной обратной связи с потребителем, учетом их пожеланий и постоянного изменения функционала продукции, а, следовательно, и ПП. При этом обратная связь осуществляется посредством интерактивных опросов для оценки качества выпускаемой продукции и её функциональных возможностей. Поэтому возможно формирование новых данных имеющих в своей структуре зависимости функциональных возможностей и пожеланий потребителей, что в свою очередь позволяет строить прогнозные модели и планировать производство новой или модернизированной продукции с заданными возможностями.

Следовательно, возможно получение ряда конкурентных преимуществ за счет своевременного и таргетированного выхода продукции на рынок. С этой точки зрения необходимо внедрение дополнительных электронных устройств, способных интегрироваться в единое информационное пространство и формировать новые данные пожеланий клиентов в ходе эксплуатации продукции.

Реализация данных возможностей позволит, кроме указанных, создавать дополнительные “цифровые” двойники” готовой продукции, характеризующих жизненный цикл изделия и “цифровые двойники” потребителей, характеризующих отклик на опыт эксплуатации данной продукции, будущие потребности и классификацию целевой аудитории.

Данные возможности позволяют получить мощный инструмент ИНС по привлечению новой, удержанию и развитию текущей клиентской базы.

Таким образом, одной из основных задач использования “цифровых двойников” механообрабатывающего производства, является высокоточное планирование его на основе всесторонней и объективной количественной оценке производственных мощностей предприятия.

Использование “цифровых двойников” позволяет осуществлять автоматическую корректировку технических норм с учетом возможностей каждой производственной единицы, её текущего и будущего состояния. При этом такая корректировка может происходить в автоматическом режиме и наглядно показывать основные тренды в изменении производственных мощностей предприятия. Данная возможность позволяет проводить оптимизацию ПП и складских запасов, а также планировать закупку комплектующих для ремонта оборудования.

Поэтому важной задачей в области “цифровизации” производства является разработка и внедрение систем автоматического сбора и хранения данных состояния оборудования и технологических процессов на различных этапах с последующим формированием статистических моделей для оптимизации производственных мощностей, снижения затрат, рисков и повышения качества продукции.

Ранее отмечалось, что нормирование - это основа цифрового производства, определяющая его эффективность. Поэтому “цифровые двойники” механообрабатывающего оборудования, оказываются важными факторами эффективности цифрового производства.

В цифровом производстве технологическое оборудование рассматривается как кибер-физические системы. Кибер-физическая система (КФС) - это основная технологическая единица "цифрового" производства [8,10], характеризующаяся высокими адаптивными и интеллектуальными возможностями за счет ассоциативного восприятия информации и постоянного обучения, оценки текущего состояния и прогнозирования будущего, способностей автономно решать задачи оптимизации и принимать правильные решения на основе анализа многомерных данных, учитывая различные, зачастую скрытые факторы реального производства

Поэтому основной задачей при организации КФС является создание на их основе “цифровых двойников” оборудования. При этом, “цифровым двойником” оборудования является, как набор нейронных сетей, характеризующих различные состояния оборудования, технологических процессов во времени, в соответствии с текущими производственными условиями, так и детализированные сборочные 3D модели объектов, отражающие связи и взаимодействия между узлами.

В этой связи, “цифровой двойник” оборудования, как и другие двойники, следует рассматривать как его электронный паспорт, его цифровую идентичность, в котором фиксируются все данные об обрабатываемых

материалах, произведенных технологических операциях, испытаниях, тестовых исследованиях и т.д.

Разработка цифрового двойника оборудования (станочной системы как кибер-физической системы-КФС) показала [8,10], что он состоит из четырех основных нейронносетевых моделей: нейронной сети сил резания, нейронной сети шероховатости, нейронной сети динамического состояния и нейронной сети износа инструмента. Силы резания деформируют упругую систему станка и вызывают погрешности формы и размеров. Износ инструмента способствует как ухудшению шероховатости обработанной поверхности детали, так снижению динамической устойчивости упругой системы станка. Вся информация по этим параметрам собирается с использованием датчиков виброакустической эмиссии (ВАЭ) и подвергается анализу и обработке с использованием разработанного нами программного обеспечения (ПО).

Задачи оптимизации производства включают также мониторинг и диагностику технологического оборудования [11-13]. Следует также оперативно отслеживать состояние склада, информацию от поставщиков и заказчиков, параметры качества сырья и продукции и т.д. в цифровом виде. Для этого необходим сбор и анализ электронных данных с учетом их назначения (поставки комплектующих, условий эксплуатации изделий и т.д.). Это обеспечит возможность интеллектуального принятия решений, снижения затрат и времени на поиск источников проблем.

Аналогичным образом можно рассмотреть и нейросетевые модели других двойников, их роль в управлении механообрабатывающим цифровым производством. Важно отметить, что двойник потребителя становится активным участником взаимодействия в цепочки формирования материальных ценностей (рис.1). Поэтому предприятие следует рассматривать не только как совокупность производственных активов, но велика уже роль и потребителя.

Совокупность цифровых двойников с различными функциональными направлениями, позволяет симулировать различные параметры деятельности предприятия от его виртуальных (нейронносетевых) моделей до реального производства. Если рассматривать "цифровой двойник" всего производства, то имеется преимущество в возможности симулировать в виртуальной среде все производственные процессы, например, определении необходимого количества и оптимального расположения оборудования и т.д. в зависимости от объема и номенклатуры выпускаемых изделий.

Все перечисленные и многие другие "цифровые двойники", отвечающие за стабильную работу производства, в итоге должны быть объединены на одной платформе для упрощенного и безошибочного обмена данными в едином информационном пространстве. Такая единая платформа разработана в НГТУ им. Р.Е.Алексеева [11-13] в виде приложений, алгоритмов и моделей. Помимо их объединения, должен быть минимизирован, а по возможности запрещен полностью вариант ручного ввода данных в систему, для исключения человеческого фактора,

производство должно быть саморегулируемым. Для этого, во главе всего цифрового механообрабатывающего производства должен встать искусственный интеллект с заложенной программой самообучения для непрерывного совершенствования производственного процесса и оптимизации на основе обработки больших данных.

”Цифровой двойник” существующего механообрабатывающего производства позволяет планировать покупку нового технологического оборудования или модернизацию существующего оборудования, либо изменение технологических процессов без вмешательства в работу реального процесса, а также прогнозное обслуживание оборудования.

Список литературы

1. Есть способ лучше: цифровой двойник повышает эффективность процессов конструкторско-технологического проектирования и производства // CAD/CAM/CAE Observer. - №3. - 2016. - С. 36-40.
2. Макаров, В.М. Нормирование - основа развития цифровых производств // Ритм машиностроения. - №10. - 2016. - С.22-27.
3. Шитиков В.К., Мاستицкий С.Э. (2017) Классификация, регрессия и другие алгоритмы Data Mining с использованием R. 351 с. – Электронная книга, адрес доступа: <https://github.com/ranalytics/data-mining>
4. Decision tree learning [Электронный ресурс] // URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Decision_tree_learning (дата обращения 15.12.18)
5. Cross-validation (statistics) [Электронный ресурс] // URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-validation_\(statistics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-validation_(statistics)) (дата обращения 15.12.18)
6. Bootstrap aggregating [Электронный ресурс] // URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrap_aggregating (дата обращения 15.12.18)
7. Boosting (machine learning) [Электронный ресурс]// URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Boosting_\(machine_learning\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Boosting_(machine_learning)) (дата обращения 15.12.18)
8. Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Серый С.В. Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта. - Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО "Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т". - 2003. - 201 с.
9. Короткий С. Нейронные сети: основные положения [Электронный ресурс]// URL: <http://www.orc.ru/~stasson> (дата обращения 15.12.18)
10. Кабалдин Ю.Г., ред. Искусственный интеллект и кибер-физические механообрабатывающие системы в цифровом производстве. - Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2018. - 271 с.
11. Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Серый С.В. Диагностика выходных параметров процесса резания в режиме реального времени на основе фрактального анализа и вейвлет-анализа с использованием программно-аппаратных средств National Instruments и Nvidia CUDA // Вестник машиностроения. - 2014. - № 8. - С. 80-82
12. Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Зотов В.О., Серый С.В. Интеллектуальные системы диагностики состояния оборудования и

- износа инструмента // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. - 2014. - № 2. - С. 47-50.
13. Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Вытнов Ю.В., Голубев С.В. Оценка состояния режущего инструмента в режиме реального времени на основе подходов нелинейной динамики с использованием NVIDIA CUDA в программной среде LABVIEW // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. - 2013. - № 5 (102). - С. 114-121.
 14. Кабалдин Ю.Г., Хлыбов А.А., Гаврилов Г.Н., Аносов М.С., Колчин П.В. Электронная модель (паспорт) металлических материалов - как основа обеспечения их надежности при эксплуатации // Вестник современных исследований. - № 1-3(28). - 2019. - С.78-87.

References

1. There is a better way: the digital double increases the efficiency of design and technological design and production processes // CAD / CAM / CAE Observer. - №3. - 2016. - P. 36-40.
2. Makarov, V.M. Rationing - the basis for the development of digital production // Rhythm of mechanical engineering. - №10. - 2016. - P.22-27.
3. Shitikov V.K., Mastitsky S.E. (2017) Classification, regression, and other Data Mining algorithms using R. 351 p. - E-book, access address: <https://github.com/ranalytics/data-mining>
4. Decision tree learning [Electronic resource] // URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Decision_tree_learning (contact date 12/15/18)
5. Cross-validation (statistics) [Electronic resource] // URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-validation_\(statistics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-validation_(statistics)) (appeal date 12/15/18)
6. Bootstrap aggregating [Electronic resource] // URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bootstrap_aggregating (appeal date 12/15/18)
7. Boosting (machine learning) [Electronic resource] // URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Boosting_\(machine_learning\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Boosting_(machine_learning)) (appeal date 12/15/18)
8. Kabaldin Yu.G., Bilenko S.V., Gray S.V. Management of dynamic processes in technological systems of mechanical processing on the basis of artificial intelligence, Komsomolsk-on-Amur: GOU VPO "Komsomolsk-on-Amur State Technical University." - 2003. -201 p.
9. Short S. Neural networks: basic provisions [Electronic resource] // URL: <http://www.orc.ru/~stasson> (the date of access 12.15.18)
10. Kabaldin Yu.G., ed. Artificial intelligence and cyber-physical machining systems in digital production. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod. state tech. un-t them. R.E. Alekseev, 2018. 271 p.
11. Kabaldin Yu.G., Laptev I.L., Shatagin D.A., Gray S.V. Diagnostics of the output parameters of the cutting process in real time based on fractal analysis and wavelet analysis using the software and hardware of National Instruments and Nvidia CUDA // Herald of Mechanical Engineering. - 2014. - № 8. - P. 80-82.

12. Kabaldin Yu.G., Laptev I.L., Shatagin D.A., Zotov V.O., Seryy S.V. Intellectual systems for diagnosing the state of equipment and tool wear // Mashinostroenie: network electronic scientific journal. - 2014. - № 2. - P. 47-50.
13. Kabaldin Yu.G., Laptev I.L., Shatagin D.A., Vytnov Yu.V., Golubev S.V. Assessing the state of the cutting tool in real time based on the approaches of nonlinear dynamics using NVIDIA CUDA in the LABVIEW software environment // Proceedings of the NSTU. R.E. Alekseeva. - 2013. - № 5 (102). - P. 114-121.
14. Kabaldin Yu.G., Khlybov A.A., Gavrilov G.N., Anosov M.S., Kolchin P.V. Electronic model (passport) of metallic materials - as a basis for ensuring their reliability during operation // Herald of Contemporary Studies. - No. 1-3 (28). - 2019. - P.78-87.

Кабалдин Юрий Георгиевич – д.т.н., профессор, uru.40@mail.ru	Yury Georgievich Kabaldin – Doctor of Technical Sciences, Professor, uru.40@mail.ru
Шатагин Дмитрий Александрович – старший преподаватель, dmitsanych@gmail.com	Shatagin Dmitry Alexandrovich – senior teacher, dmitsanych@gmail.com
Аносов Максим Сергеевич – старший преподаватель, ansv-maksim@rambler.ru	Anosov Maksim Sergeevich – senior teacher, ansv-maksim@rambler.ru
Колчин Павел Владимирович – аспирант, posledny@mail.ru	Kolchin Pavel Vladimirovich – postgraduate student, posledny@mail.ru
Кафедра «Технология и оборудование машиностроения», Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г.Нижний Новгород, Россия	Department of engineering Technology and equipment, Nizhny Novgorod state technical University. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia

Received 04.02.2019