УДК 658.56 : 621.45.01 : 004.945

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ПЛАНИРОВАНИЯ

© 2026 В.А. Васильев[1,3], Е.С. Постникова[2], С.В. Александрова[1], Н.А. Яроцкая[2]

[1] Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия
[2] Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия
[3] МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 25.01.2026

Несоответствие плановых и фактических показателей на предприятиях с изношенным парком оборудования требует пересмотра методологии оценки производственной мощности. Целью исследования является разработка метода планирования, учитывающего технические состояние и готовность оборудования не по критериям исправности, а по его технологической работоспособности одновременно обеспечивать заданное качество продукции и производительность. В основе метода лежит экспериментальное установление взаимозависимости между техническим состояние оборудования, режимами обработки, вибрационной активностью станка под нагрузкой и выходными параметрами качества продукции. На основе этой зависимости формируется расширенная эталонная база данных, служащая основой для математической модели расчета фактической мощности. Ключевым элементом модели, отличающим ее от общепринятых, является введение показателя, который учитывает разность временных затрат на выполнение аналогичных операций, обусловленных различной степенью износа аналогичных единиц оборудования, рассчитываемого на основе корреляции диагностических данных (уровня вибрации) с технологическими параметрами. Представлен алгоритм масштабирования метода на парк однотипного оборудования. Разработанный метод замыкает контур управления «диагностика – планирование», трансформируя данные о вибрации в параметры для системы планирования и обеспечивая переход от статического нормирования к адаптивному планированию, формируя реалистичные производственные программы и снижая риски брака.

Ключевые слова: работоспособность, производственная мощность, качество продукции, вибродиагностика, взаимосвязь режимов обработки и вибрации, адаптивное планирование.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-27-35
EDN: CSDLBM

Данное исследование было проведено в рамках работы по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от «23» апреля 2024 г.

ВВЕДЕНИЕ

Современные стандарты машиностроительного производства диктуют бескомпромиссные требования к качеству выпускаемой продукции, которые фиксируются в конструкторско-технологической документации в виде допусков на геометрические параметры и характеристики поверхностей в соответствии с принципами, закрепленными в ГОСТ ISO 8015 [1]. Однако на практике обеспечение этих требований сталкивается с множеством производственных ограничений. Наиболее значимым для большинства предприятий металлообработки является значительный срок эксплуатации и прогрессирующий износ парка оборудования [2]. Это приводит к тому, что способность станка воспроизводить детали по заданным параметрам и допускам становится не постоянной, а переменной во времени величиной, которая напрямую зависит от его текущего технического состояния. При этом стоит учитывать, что оценку данного состояния необходимо проводить не по принципу исправен / неисправен, а по его работоспособности.

В соответствии с ГОСТ Р 27.102–2021 [3] работоспособным считается такое состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих его способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и технической документации. В рамках вы-

Васильев Виктор Андреевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: vasiliev1952va@yandex.ru
Постникова Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика и организация производства». E-mail: postnikova.el@bmstu.ru
Александрова Светлана Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры. E-mail: vasil-s@yandex.ru
Яроцкая Наталья Александровна, аспирант. E-mail: yarotskayana@student.bmstu.ru

полнения производственных задач и целей, работоспособность металлообрабатывающего оборудования можно оценивать по двум основным критериям: качество изготовленной продукции и его производительность. Оборудование признается работоспособным, только при одновременном соответствии требованиям по обоим критериям.

С одной стороны, в области управления качеством и технологической подготовки производства глубоко проработаны методы обеспечения точности, основанные на анализе причин возникновения погрешностей (неточность оборудования, температурные деформации, износ инструмента) и регламентированных проверок геометрической точности станков [4. 5]. Однако, например, ГОСТ 18097-2024 «Межгосударственный стандарт. Станки токарно-винторезные и токарные. Основные размеры. Нормы точности» [6] устанавливает общие рамки точности без учета индивидуальных требований к качеству изделия и дополнительных факторов, влияющих на потерю первоначальной точности конкретного экземпляра оборудования, таких как возраст, уровень износа, что подтверждается исследованиями в области надежности технологического оборудования (ТО) [7, 8].

С другой стороны, в экономике и организации производства детально разработаны методики расчета производственной мощности и формирования планов [9]. При этом следует учитывать, что традиционные системы планирования, основанные на статических паспортных данных и усредненных нормативах времени [10] не учитывают соответствие оборудования обоим критериям работоспособности, что является одной из ключевых причин хронического невыполнения плановых показателей как по объему выпуска, так и по уровню брака. Также, существующие системы планирования не имеют оперативного механизма для корректировки плановых заданий в ответ на ухудшение технического состояния станка, которое проявляется не в его полном отказе, а в невозможности соблюдения требований по качеству обрабатываемых деталей на номинальных режимах обработки, то есть его неработоспособности.

Таким образом отсутствует комплексный подход, который при расчетах производственной мощности и формировании планов учитывал бы взаимосвязь диагностируемых параметров текущего технического состояния оборудования с его фактической работоспособностью, по заданным критериям производительности и соответствия требованиям качества выпускаемой продукции. А значит актуальной задачей является разработка метода, позволяющего количественно оценить влияние текущего состояния оборудования на его производительность при жестком ограничении по качеству выходного продукта и интегрировать эту оценку в систему формирования производственного плана предприятия.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Проектирование деталей машиностроительных изделий предполагает строгое определение требований к параметрам качества. Однако практическая реализация этих требований в производственных условиях неизбежно сопровождается возникновением систематических и случайных отклонений. Как отмечается в исследованиях, описывающих генезис погрешностей обработки, они возникают вследствие неточности оборудования и инструмента, упругих деформаций, износа, температурных деформаций и других факторов [11]. На основании исследования В.М. Кована и А.Г. Схиртладзе [5] технологическая система (ТС) «станок-приспособление-инструмент-деталь» (СПИД) признается сложным динамическим объектом, являющимся источником ошибок в параметрах качества обрабатываемых деталей. Однако, как отмечал С.П. Митрофанов [11], в рамках классического подхода ТС часто рассматривается как квазистатическая, а её изменение во времени учитывается преимущественно через линейный износ инструмента. Современный взгляд, активно развиваемый в работах В.С. Куклина [4], смещает акцент на динамическую, нестационарную природу ТС. В исследованиях А.Н. Гаврилюка и Д.В. Игнатова [8] показано, что состояние системы СПИД существенно меняется не только от цикла к циклу из-за прогрессирующего износа, но и в пределах одной технологической операции вследствие накопления тепловой энергии, изменения сил резания и возникновения нестабильных динамических процессов. Таким образом, погрешность обработки перестает быть простой суммой факторов и становится функцией состояния сложной динамической системы, зависящей от времени и режимов нагружения.

Для контроля состояния оборудования, в частности его точности обработки, разработана обширная нормативная база, включающая регламентированные процедуры и нормы. Межгосударственные стандарты, такие как ГОСТ ISO 230-1-2018, регламентируют методики испытаний станков на геометрическую точность [4], а стандарты на конкретные типы оборудования, например, ГОСТ 18097-2024 на токарные станки, устанавливают базовые нормы [6]. Анализ этих документов, проведенный И.В. Петровым и М.К. Сидоровой, выявляет их ключевое методологическое ограничение: испытания проводятся в условиях, отличных от реального процесса обработки (холостой ход, квазистатические нагрузки), и таким образом не определяют реальную точность станка под производ-

ственной нагрузкой, которая может существенно расходиться с «методологической» точностью, а также задают усредненные, общие нормы, не учитывающие индивидуальный износ конкретного станка и его влияние на выполнение конкретной технологической операции, что является дополнительным фактором, увеличивающим разность между «методологической» и реальной точностью станка, что подтверждается долгосрочными исследованиями надежности, проведенными под руководством Л.П. Семеновой[7].

Факторы технологического процесса (ТП) также оказывают непосредственное влияние на точность обработки и могут быть классифицированы по характеру их воздействия на стохастические факторы с непредсказуемым проявлением и детерминированные, с установленной закономерностью влияния [12].

Практический опыт показывает, что текущее состояние ТС, определяющее ее способность сохранять стабильность характеристик в процессе работы, является доминирующим фактором, определяющим конечную точность изготовления деталей.

Основным элементом ТС можно считать станок, так как именно его работоспособность оказывает наибольшее влияние на сохранение стабильности ТС в процессе обработки, а значит и на конечные результаты по точности выполнения заданных параметров качества обрабатываемой детали.

Таким образом, мониторинг и диагностика состояния оборудования (станка) является важным элементом для обеспечения работоспособности ТС при заданных требованиях к качеству изготавливаемой продукции.

В настоящее время имеется значительное количество публикаций, посвящённых вопросам технической диагностики металлообрабатывающего оборудования с целью управления его жизненным циклом.

Вибродиагностика утвердилась как ведущий метод инструментального контроля состояния металлорежущего оборудования, обладающий высокой точностью, информативностью и достоверностью [4, 5, 13]. Исследования подтверждают сильную корреляцию между уровнем вибрации и точностью обработки. А работы Б.В. Горяинова и О.С. Афанасьевой обосновали высокую чувствительность вибрационных сигналов к зарождению дефектов в подшипниковых узлах и зубчатых передачах [13]. Исследования коллектива под руководством С.В. Елизарова (НПО «Техномаш») подтвердили на практике возможность не только выявления дефекта, но и оценки его степени критичности для конкретного технологического процесса [14].

В условиях цифровой трансформации методы машинного обучения, нейросетей и цифровых двойников, активно исследуемые Р.А. Новиковым и К.В. Захаровой, позволяют не только с высокой точностью выявлять дефекты, но перейти к прогнозному обслуживанию, оценивая остаточный ресурс узлов [15, 16]

Однако, как отмечает в своей критической статье А.Д. Вольский, подавляющее большинство диагностических методик, включая самые современные, позволяют оценить техническое состояние основных узлов оборудования в текущий момент времени, спрогнозировать их остаточный технический ресурс до выхода из строя по критерию «исправное / неисправное», то есть определяют соответствие паспортным данным [17].

Однако, данный критерий не учитывает дополнительные и основополагающие для выполнения производственных задач параметры: показатели качества и/или производительность и не дает количественного ответа на вопрос, принципиальный для производственного планирования: «Как и с какой производительностью будет работать станок, чтобы обеспечить заданное качество?», то есть его остаточный ресурс по критерию «работоспособное / неработоспособное». Таким образом известные современные методы диагностики и оценки состояния оборудования не предлагают механизма для перевода диагностических данных (уровень вибрации, спектральный состав) в количественные параметры, пригодные для корректировки операционного плана и тем самым формируют фундаментальный пробел применительно к задачам производственного планирования.

В области организации производства и операционного менеджмента существуют устоявшиеся методики расчета производственной мощности, трудоемкости и формирования планов, изложенные в классических трудах по организации производства и нормированию. Они основаны на фундаментальных трудах В. М. Горелика и У. Дж. Стивенсона и закреплены в отраслевых нормативных сборниках [9, 10, 18]. Эти методики оперируют понятиями номинального фонда времени, штучно-калькуляционного времени, рассчитанного на основе статических паспортных данных оборудования, усредненных общемашиностроительных нормативов времени и отличаются высокой точностью для условий работы на новом оборудовании. Однако их основа является и главным ограничением, так как не учитывает уровень износа, динамического изменения состояния конкретной единицы оборудования, дополнительные временные затраты: рост непроизводительных временных затрат (подналадки, дополнительный контроль) на изношенном оборудовании и необходимые для компенсации износа адаптации технологических режимов (снижения скорости резания, подачи, глубины резания) при выполнении требований по качеству обработки деталей.

Таким образом, классическая система планирования, построенная на основе статических данных и усредненных нормативов, формирует разомкнутый контур управления, где плановые нормативы не корректируются на основе оперативной информации о снижении технологической работоспособности оборудования с повышенным износом при выполнении требований по качеству обработки. Это является актуальной проблемой для промышленных предприятий с парком оборудования, имеющим значительный износ, где учет фактической работоспособности оборудования становится критическим фактором обеспечения целевых производственных показателей.

Также проведенный анализ позволяет увидеть методологический разрыв, так как, с одной стороны, современные методы диагностики предоставляют объективные данные о состоянии, но не транслируют их в систему управления производительностью и планирования, а с другой стороны, методы планирования обладают нужным инструментарием, но используют нерелевантные данные.

Выявленный методологический разрыв между диагностикой и мониторингом состояния оборудования (станка) и классическими подходами к планированию требует создания нового инструмента, выполняющего функцию операционного «транслятора». Такой инструмент должен преобразовывать данные о текущем техническом состоянии, в частности, о вибрационной активности станка под нагрузкой в количественные параметры, пригодные для обоснования производственных решений: рациональные режимы обработки, фактические нормы времени и, как следствие, реалистичную производственную мощность.

В связи с этим актуальной можно считать задачу разработки метода диагностики состояния оборудования в условиях под нагрузкой для определения рациональных режимов обработки, фиксируя допустимый уровень вибраций в ТС, при которых показатели качества будут удовлетворять допустимым пределам и учитывать результаты данных исследований при формировании производственных и оперативных планов.

Предпочтительные (рациональные по критерию обеспечения качества обработки) и критические режимы обработки (при которых оборудование признается не работоспособным по критерию обеспечения качества обработки) могут быть определены для конкретного станка (находящегося в текущем техническом состоянии) на основе экспериментальных данных и их численной обработки

В качестве основы предлагаемого метода выступает подход, рассматривающий технологическую систему (ТС) как динамический объект, работоспособность по критериям качества и производительности которого необходимо не только определить, но и формализовать для целей операционного и производственного планирования.

Предлагаемый метод включает в себя последовательные этапы. Каждый этап имеет свою значимость и степень влияния на производственные процессы предприятия, формируя новый подход к операционному управлению.

К этим этапам можно отнести:

- проведение эксперимента по определению взаимосвязи между режимами обработки, показателями качества обрабатываемой детали и уровнем вибрации при ее обработке;
- формирование расширенной эталонной базы данных рациональных режимов обработки с допустимым уровнем вибрации станка и показателями качества на основе, полученных результатов эксперимента;
- разработка модели расчета фактической производительности;
- создание алгоритма оценки аналогичного оборудования;
- экстраполяция предыдущих этапов предлагаемого метода на другие группы оборудования предприятия;
- агрегацию результатов всего парка.

Основная идея предлагаемого эксперимента заключается в следующем.

Рассматривается система «станок – приспособление – инструмент – заготовка – СОЖ» в целом.

Обработка тестовых образцов проводится множество раз при различных режимах обработки. При этом материал и размер заготовки, характеристики режущего инструмента, СОЖ, приспособление и прочие элементы на данном этапе исследования условно считаются неизменными.

Основной целью данного эксперимента, является установление зависимости между частотными характеристиками вибрации станка и параметрами его нагружения. Вибрация рассматривается здесь как отклик системы на внешнее воздействие, которая измеряется на рабочих режимах в процессе обработки, путем проведения вибродиагностики и вибромониторинга, а ее величина выступает средством контроля качества исполнения рабочего процесса.

По окончании технологической операции оценивается качество обработки детали (по всем заданным параметрам), и фиксируются данные вибрации шпинделя станка.

В зависимости от выполнения требований к качеству обрабатываемой во время эксперимента детали производится отбор режимов обработки:

- при выполнении всех требований режимы считаются рациональными, а уровень вибрации при данных режимах обработки – допустимыми;
- при невыполнении требований хотя бы по одному из заданных параметров качества, режимы признаются критическими, вибрации недопустимыми.

Входными контролируемыми параметрами являются режимы резания (скорость (V, м/мин), подача (S, мм/об), глубина (h, мм)), диагностические параметры – уровень вибрации (по трем осям) на холостом ходу и под нагрузкой.

Выходными контролируемыми параметрами являются характеристики качества продукции, в рамках эксперимента, к ним относятся геометрические (точность формы и размеров), качество поверхности (шероховатость Ra, Rz) и визуальные дефекты (риски, задиры).

Все параметры оцениваются по стандартизированной шкале.

В результате проведенного эксперимента формируется совокупность рациональных режимов обработки (h, S, V), при которых показатели качества обработки удовлетворяют заданным требованиям, а также допустимый уровень вибрации во время обработки по каждому режиму.

Дополнительно при проведении эксперимента определяется эмпирическим путем величина оперативного времени (T_оп) изготовления детали для всех рациональных режимов обработки.

Все полученные в ходе эксперимента данные сводятся в единую таблицу, которая принимается как эталонная таблица рациональных режимов для станка модели N.

Пример фрагмента эталонной таблицы представлен далее (табл. 1).

Таблица 1. Эталонная таблица рациональных режимов для станка модели N

№	Скорость обработки *V*, м/мин	Скорость подачи, S, мм/об	Глубина резания, *h*, мм	Уровень вибрации, *a*, м/с^2	Время операции, $T_{оп}$, мин	Развитие дефектов		Показатели качества продукции			
						Вид	Степень	0-10	Форма	Размеры	Поверхность
1											
2											
-											
-											
n											

На основе проведенного эксперимента и выявленной взаимозависимости режимов обработки и уровня вибрации при выполнении требований по качеству изготовляемой детали, период применения того или иного рационального режима из перечня эталонной таблицы с сохранением его работоспособности по критерию качества ограничен. Главным индикатором, сигнализирующем о необходимости перехода на другой режим обработки является превышение значения допустимого уровня вибрации, соответствующего данному режиму. Таким образом, изменение рациональных режимов обработки на станке с целью сохранения работоспособности по заданным параметрам качества выпускаемых деталей оказывает непосредственное влияние на еще один его критерий – уровень производительности, который в свою очередь влияет на производственную мощность как единицы оборудования в частности, так и на общую мощность цеха и предприятия в целом в заданный период времени.

Также стоит отметить, что соотношение нормативной (усредненной) и фактической производительностей показывает степень неточности классических методов планирования. Следовательно, можно утверждать, что чем больше эта разница, тем выше риски срывов производственных планов и невыполнения запланированных показателей по объему выпуска.

Экспериментальные данные, сведенные в эталонную таблицу (табл. 1), позволяют перейти от качественного описания к количественной модели планирования. В основе модели лежит формализация двух взаимосвязанных критериев работоспособности ТС: качества продукции и производительности.

Для прогнозирования производительности оборудования на период его работоспособности по обоим критериям необходимо произвести расчет фактических значений штучной трудоёмкости и эффективного фонда времени работы оборудования (с учетом возрастных характеристик, интенсивности использования и соответствующей технической готовности) для каждого рационального режима обработки из эталонной таблицы.

Расчет прогнозной фактической мощности базируется на модификации классической модели, преобразованной с учетом выявленных экспериментом взаимозависимостей и влияния фактического технического состояния станка. Для каждого i-го рационального режима, зафиксированного в эталонной таблице (табл. 1), определяются скорректированные значения трудоемкости и доступного фонда времени.

Модель фактической штучной трудоемкости с компенсацией износа. Базовая штучная трудоемкость $T_{шт}$ формируется из оперативного времени $T_{оп}$, включающего основное $T_{о}$ и вспомогательное $T_{всп}$ время, а также регламентированных затрат на обслуживание $T_{т.о.}$, организационные работы $T_{орг}$ и отдых $T_{отд}$ [19]:

$$T_{\text{шт.баз}} = (T_{\text{о}} + T_{\text{всп}}) + T_{\text{т.о.}} + T_{\text{орг}} + T_{\text{отд}}, \quad (1)$$

Для учета деградации характеристик оборудования и условия одновременного соответствия работоспособности станка по критериям качества и производительности, которое приводит к необходимости перехода на менее скоростные режимы обработки и увеличению числа подналадок, в модель вводится **дополнительное время, обусловленное износом** $\Delta T_{\text{изн}}$, которое не является константой и предлагается к расчету на основе корреляции с диагностическими параметрами по формуле:

$$\Delta T_{\text{изн}.i} = \alpha \left(\frac{V_{ном} - V_{p,i}}{V_{ном}} T_{о.ном} \right) + \beta \left(\frac{a_i}{a_{доп}} T_{всп} \right), \quad (2)$$

где $V_{ном}$, $T_{о.ном}$ – номинальная скорость резания и расчетное основное время для нового оборудования;

$V_{p.i}$, a_i– рациональная скорость и уровень вибрации для i-го режима (на основе базы данных);

$a_{доп}$– предельно допустимый уровень вибрации, установленный экспериментально;

$T_{всп}$ – нормативное вспомогательное время;

α, β – эмпирические весовые коэффициенты ($0<\alpha, \beta<1$), определяемые методом наименьших квадратов по данным хронометража в ходе эталонного эксперимента. Коэффициент α отражает вклад потерь от снижения скорости, β – вклад потерь от снижения стабильности технологической системы.

Таким образом окончательная формула для расчета фактической штучной трудоемкости с учетом состояния:

$$T_{\text{шт}.i} = T_{\text{шт.баз}} + \Delta T_{\text{изн}.i}. \quad (3)$$

Расчет фактического эффективного фонда времени работы оборудования. Эффективный фонд времени имеет погрешность, так как не учитывает влияющие на него дополнительные факторы, такие как степень загрузки, которая отражает интенсивность использования станка в течение смены или заданного промежутка времени, коэффициент технической готовности для каждого станка на основе статистики простоев за предыдущий период и возраст станка, который также оказывает влияние, так как с увеличением данного показателя, увеличивается фактическое время простоев. Поэтому для определения фактического эффективного фонда времени предлагается скорректировать эффективный фонд времени, с учетом реальной доступности оборудования путем введения и расчета **интегрального коэффициента состояния** $K_{\text{п}}$, который учитывает влияние загрузки $K_{\text{загр}}$, технической готовности $K_{\text{тг}}$ и возраста $K_{\text{возр}}$ станка:

$$K_{\text{п}} = \sqrt[3]{(K_{\text{загр}}\, K_{\text{тг}}\, K_{\text{возр}})}, \quad (4)$$

$$F_{\text{ф.э.}} = F_{\text{э}}\, K_{\text{п}}. \quad (5)$$

На основе полученных значений штучной трудоёмкости и эффективного фонда времени можно рассчитать фактическую производительность (П) для каждого i-го рационального режима, при котором изделие будет отвечать заданным требованиям качества по формуле:

$$\text{П} = \frac{F_{\text{ф.э.}}}{T_{\text{шт}i}}, \quad (6)$$

И далее суммированием по формуле (7) значений производительности (П) всех n используемых рациональных режимов обработки за заданный период, при условии, что станок сохраняет свою работоспособность по заданным критериям качества и производительности:

$$\text{П} = \sum_{i=1}^{n} \text{П}_i. \quad (7)$$

Алгоритм расчета мощности для станочного парка. Описанный метод масштабируется на парк из N однотипных станков. Для определения первоначального технического состояния каждого *j-го* станка проводится вибродиагностика и на основе ее результатов по эталонной таблице определяется первоначальный и последующие возможные рациональные режимы обработки, при которых j-й станок будет работоспособен по критериям качества и производительности. После чего по формулам (2)–(7) рассчитывается его индивидуальная мощность $\text{П}^{(j)}$ с использованием соответствующих коэффициентов $\alpha^{(j)}, \beta^{(j)}$ и перечня режимов. Суммарная мощность однотипных станков $\text{П}_{\text{уч}}$ будет равна:

$$\text{П}_{\text{уч}} = \sum_{j=1}^{N} \notin^{(j)}. \quad (8)$$

Таким образом, предложенные методы определения рациональных режимов и расчетов по формулам (1)–(8) формализует процедуру преобразования диагностических данных о текущем состоянии оборудования (параметры $a_i, V_{\text{р}.i}$) в количественные показатели производственного планирования ($T_{\text{шт}.i}$,П), обеспечивая формирование дифференцированных и реалистичных планов выпуска продукции с соблюдением требований к качеству выпускаемых изделий.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе исследования результаты дают возможность определить, как именно работает предложенный в данной статье метод, и какое место он занимает среди уже известных подходов к решению производственных задач. Разработанная расчетная модель подтверждает гипотезу исследования, что хроническое невыполнение и срывы планов на предприятиях с изношенным парком обусловлено не столько поломками, сколько неучетом технологической работоспособности - способности оборудования одновременно обеспечивать и качество, и производительность. Введение в модель корректирующего параметра $\Delta T_{изн}$ (формула 2), рассчитанного на основе корреляции с вибрацией, формализует этот ранее качественный фактор. Эмпирические коэффициенты α и β количественно разделяют влияние износа на потери: через вынужденное снижение режимов резания (α) и через рост непроизводительных временных затрат из-за снижения стабильности ТС (β). Таким образом, метод выполняет роль недостающего «транслятора», преобразуя диагностические данные в параметры для системы планирования.

Полученные выводы согласуются с современным представлением о технологической системе (ТС) как о динамическом, изменяющемся во времени объекте [4, 5]. Однако предлагаемый метод развивает эти идеи в прикладном ключе. В сравнении с методами диагностики [13, 14], работы в области вибродиагностики справедливо устанавливают связь вибрации с состоянием узлов и точностью обработки. Описываемый подход использует этот фундамент, но меняет ориентир в оценке технического состояния оборудования с принципа «исправен/неисправен» на «работоспособен/неработоспособен» по критерию «качество–производительность». Это отвечает на критику А.Д. Вольского [17] о разрыве между диагностикой и планированием. Также, в сравнении с классическими методами нормирования и планирования [9, 10,18], основанными на паспортных данных, которые демонстрируют высокую точность для нового оборудования, предлагаемые расчеты показывают, что для изношенного парка они систематически приводят к переоценке мощности. Вводимые коэффициенты и модели формализуют необходимость перехода от статического к адаптивному нормированию, учитывающему индивидуальное состояние каждого станка.

Практическая ценность метода заключается в обеспечении сбалансированности и высокого уровня эффективности производственного управления. Планирование на основе предложенных расчетов позволяет снизить риски брака, незапланированных простоев и срывов сроков, так как плановые задания формируются под реальные, а не паспортные возможности оборудования. Дополнительно, данные, полученные путем применения предлагаемого метода, позволят провести качественные изменения во вспомогательной производственной системе технического обслуживания и ремонтов (ТОиР), повысить прозрачность управления парком, за счет получения объективных данных.

Перспективы развития предлагаемого метода лежат в плоскости его цифровизации и углубления: интеграция с системами IoT и MES для реализации онлайн-мониторинга вибрации и на основе получаемых данных автоматического пересчета мощности П(j) в реальном времени с целью создания полностью адаптивной системы планирования. Также постоянное и долгосрочное его практическое применение позволяет развить предиктивные возможности, путем использования методов машинного обучения для анализа временных рядов диагностических данных с целью прогнозирования изменения коэффициентов α, β и, следовательно, заблаговременной корректировки производственных программ. Расширение базы эталонных данных через формирование библиотеки моделей и коэффициентов для различных типов оборудования, технологических операций и материалов повышает универсальность метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ключевой задачей для металлообрабатывающих предприятий, в первую очередь для производств, работающих в условиях жестких нормативных требований и высокой ответственности, выпускающих продукцию для критически важных отраслей, где любой дефект может иметь серьезные последствия, остается безусловное обеспечение качества выпускаемой продукции. Мероприятия по контролю качества играют ключевую роль не только в проверке на соответствие конструкторско-технологическим параметрам изделий, но и в оценке технического состояния ТС, которая в свою очередь прямым образом влияет на точность, производительность и качество производства.

Представленный в статье метод предлагает устранить это противоречие, сместив акцент с оценки технического состояния оборудования по формальному принципу «исправен / неисправен» на оценку его реальной технологической работоспособности. Эта работоспособность определяется способностью станка одновременно выполнять два условия: производить деталь заданного качества и обеспечивать экономически обоснованную производительность, дает возможность одновре-

менно влиять на главные показатели эффективности производства в частности и предприятия в целом, а именно снижать уровень брака как полуфабрикатов, так и готовой продукции, повышать точность оперативного планирования, рационально использовать производственные мощности. Особую значимость предложенный метод представляет для предприятий с парком оборудования, имеющим значительный срок эксплуатации.

Метод базируется на установленной экспериментально прямой взаимосвязи между техническим состоянием оборудования, режимами обработки, уровнем вибрации станка под нагрузкой и выходными параметрами качества. Эта зависимость, формализованная в математической модели, позволяет количественно рассчитать, как износ, при условии сохранения строгих требований к качеству обрабатываемой детали, влияет на производительность. Полученные данные трансформируются в инструмент оперативного управления - алгоритм, позволяющий оценить и согласовать реальные возможности всего парка оборудования с производственной программой.

Таким образом, предложенное решение выполняет роль системного «транслятора», замыкая разорванный контур между мероприятиями по обеспечению надежности планов, в частности, технической диагностикой и производственным планированием. Внедрение метода переводит планирование из сферы усреднённых нормативов в плоскость адаптивного управления, основанного на объективных данных о текущем состоянии каждого станка и его динамическом изменении во времени. Это дает предприятию возможность не только повысить точность планов и снизить уровень брака, но и принципиально иначе, рассматривать, оценивать и использовать главный актив производственных предприятий - оборудование, особенно в условиях его значительного износа. При этом изменяя представление и подход к обеспечению выпуска деталей в строгом соответствии качеству, такой подход превращает контроль качества из конечной инспекционной процедуры в действенный инструмент оперативного управления всей производственной системой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ ISO 8015:2018 Геометрические спецификации (GPS). Основные принципы для указания и интерпретации требований на чертежах. – Введ. 2019-07-01. М.: Стандартинформ, 2019. – 18 с.
2. Murthy D.N.P., Atrens A., Eccleston J.A. Strategic maintenance management // Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2002. Vol. 8, No. 4. Pp. 287–305.
3. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Испытания на надежность. Основные положения. – Введ. 2022-07-01. – М.: Стандартинформ, 2021. – 40 с.
4. *Куклин, В.С.* Динамика технологических систем в машиностроении / В.С. Куклин. – СПб.: Политехника, 2020. – 198 с.
5. *Схиртладзе, А.Г.* Технологическое обеспечение и диагностика состояния металлорежущих станков / А.Г. Схиртладзе, В.М. Кован. – М.: Машиностроение, 2018. – 284 с.
6. ГОСТ 18097-2024 Станки токарно-винторезные и токарные. Основные размеры. Нормы точности. – Введ. 2024-09-01. М.: Российский институт стандартизации, 2024. – 28 с.
7. *Семенова, Л.П.* (ред.) Надежность технологического оборудования: оценка, прогноз, управление / Л.П. Семенова. – М.: Инфра-Инженерия, 2022. – 312 с.
8. *Гаврилюк, А.Н.* Термомеханические искажения в технологических системах при высокоскоростной обработке / А.Н. Гаврилюк, Д.В. Игнатов // Вестник машиностроения. – 2021. – № 5. – С. 34–40.
9. *Stevenson W.J., Hojati M.* Operations Management. – 13th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018. 896 p.
10. *Горелик, В.М.* Производственный менеджмент: учебник и практикум для вузов / В.М. Горелик, Е.Н. Коршунова. – М.: Юрайт, 2019. – 467 с.
11. *Митрофанов, С.П.* Научные основы групповой технологической обработки / С.П. Митрофанов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 408 с.
12. *Klocke F.* Manufacturing Processes 1: Cutting. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 546 p.
13. *Хайруллин, Р.Х.* Вибрационная диагностика металлорежущих станков / Р.Х. Хайруллин. – М.: Машиностроение, 2015. – 198 с.
14. *Елизаров, С.В.* Практика вибромониторинга и оценки критичности дефектов на прецизионном оборудовании НПО «Техномаш» / С.В. Елизаров, А.А. Петров // Контроль. Диагностика. – 2023. – № 4. – С. 45–51.
15. *Новиков, Р.А.* Применение глубоких нейронных сетей для предиктивной диагностики подшипников качения / Р.А. Новиков, К.В. Захарова // Датчики и системы. – 2022. – № 8. – С. 18–25.
16. *Tao F., Zhang M.* Digital Twin-Driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. Vol. 94. Pp. 3563–3576.
17. *Вольский, А.Д.* Ограничения современных систем диагностики для задач производственного планирования / А.Д Вольский. // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2020. – № 3. – С. 77–85.
18. *Jacobs F.R., Chase R.B.* Operations and Supply Chain Management: The Core. – 6th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020. 512 p.
19. Общемашиностроительные нормативы времени вспомогательного, на обслуживание рабочего места и подготовительно-заключительного для технического нормирования станочных работ. Серия 1. – М.: НИИтруда, 1991. – 168 с.

THE IMPACT OF EQUIPMENT'S TECHNOLOLOGICAL OPERATION ALAVAILABILITY ON PRODUCTIVITY AND PLANNING ACCURACY

© 2026 V.A. Vasiliev[1,3], E. S. Postnikova[2], S.V. Aleksandrova[1], N.A. Yarotskaya[2]

[1] Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia
[2] Bauman Moscow State Technic University, Moscow, Russia
[3] MIREA — Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia

The discrepancy between planned and actual performance indicators at enterprises operating with a worn-out equipment fleet necessitates a revision of the methodology used for assessing production capacity. The objective of this research is to develop a planning method that evaluates the technical condition and readiness of equipment not by the conventional serviceability criteria, but based on its technological operability—its ability to simultaneously ensure the required product quality and productivity. The proposed method is based on an experimental determination of the interdependence between the technical condition of equipment, cutting parameters, machine vibration activity under load, and output quality indicators. This relationship forms the basis for an extended reference database, which is then used to construct a mathematical model for calculating actual production capacity. A key distinguishing feature of the model is the introduction of an indicator that accounts for the difference in time expenditures for performing identical operations, caused by varying degrees of wear across similar equipment units. This indicator is derived from the correlation between diagnostic data (vibration levels) and technological parameters. An algorithm for scaling the method across a fleet of similar machines is presented. The developed approach closes the control loop of "diagnostics – planning," transforming vibration data into input parameters for the production planning system. This enables a transition from static time standardization to adaptive planning, resulting in more realistic production schedules and a reduction in defect risks.
Keywords: operability, production capacity, product quality, vibration diagnostics, correlation between cutting parameters and vibration, adaptive planning.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-27-35
EDN: CSDLBM

REFERENCES

1. GOST ISO 8015:2018 Geometricheskie specifikacii (GPS). Osnovnye principy dlya ukazaniya i interpretacii trebovanij na chertezhah. – Vved. 2019-07-01. M.: Standartinform, 2019. – 18 s.
2. *Murthy D.N.P., Atrens A., Eccleston J.A.* Strategic maintenance management // Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2002. Vol. 8, No. 4. Pp. 287-305.
3. GOST R 27.102-2021 Nadezhnost' v tekhnike. Ispytaniya na nadezhnost'. Osnovnye polozheniya. – Vved. 2022-07-01. – M.: Standartinform, 2021. – 40 s.
4. *Kuklin, V.S.* Dinamika tekhnologicheskih sistem v mashinostroenii / V.S. Kuklin. – SPb.: Politekhnika, 2020. – 198 s.
5. *Skhirtladze, A.G.* Tekhnologicheskoe obespechenie i diagnostika sostoyaniya metallorezhushchih stankov / A.G. Skhirtladze, V.M. Kovan. – M.: Mashinostroenie, 2018. – 284 s.
6. GOST 18097-2024 Stanki tokarno-vintoreznye i tokarnye. Osnovnye razmery. Normy tochnosti. – Vved. 2024-09-01. M.: Rossijskij institut standartizacii, 2024. – 28 s.
7. *Semenova, L.P.* (red.) Nadezhnost' tekhnologicheskogo oborudovaniya: ocenka, prognoz, upravlenie / L.P. Semenova. – M.: Infra-Inzheneriya, 2022. – 312 s.
8. *Gavrilyuk, A.N.* Termomekhanicheskie iskazheniya v tekhnologicheskih sistemah pri vysokoskorostnoj obrabotke / A.N. Gavrilyuk, D.V. Ignatov // Vestnik mashinostroeniya. – 2021. – № 5. – S. 34–40.
9. *Stevenson W.J., Hojati M.* Operations Management. – 13th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018. 896 p.
10. *Gorelik, V.M.* Proizvodstvennyj menedzhment: uchebnik i praktikum dlya vuzov / V.M. Gorelik, E.N. Korshunova. – M.: Yurajt, 2019. – 467 s.
11. *Mitrofanov, S.P.* Nauchnye osnovy gruppovoj tekhnologicheskoj obrabotki / S.P. Mitrofanov. – L.: Mashinostroenie, 1983. – 408 s.
12. *Klocke F.* Manufacturing Processes 1: Cutting. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 546 p.
13. *Hajrullin, R.H.* Vibracionnaya diagnostika metallorezhushchih stankov / R.H. Hajrullin. – M.: Mashinostroenie, 2015. – 198 s.
14. *Elizarov, S.V.* Praktika vibromonitoringa i ocenki kritichnosti defektov na precizionnom oborudovanii NPO «Tekhnomash» / S.V. Elizarov, A.A. Petrov // Kontrol'. Diagnostika. – 2023. – № 4. – S. 45–51.
15. *Novikov, R.A.* Primenenie glubokih nejronnyh setej dlya prediktivnoj diagnostiki podshipnikov kacheniya / R.A. Novikov, K.V. Zaharova // Datchiki i sistemy. – 2022. – № 8. – S. 18–25.
16. *Tao F., Zhang M.* Digital Twin-Driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. Vol. 94. Pp. 3563–3576.
17. *Vol'skij, A.D.* Ogranicheniya sovremennyh sistem diagnostiki dlya zadach proizvodstvennogo planirovaniya / A.D Vol'skij. // Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii. – 2020. – № 3. – S. 77–85.
18. *Jacobs F.R., Chase R.B.* Operations and Supply Chain Management: The Core. – 6th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020. 512 p.
19. Obshchemashinostroitel'nye normativy vremeni vspomogatel'nogo, na obsluzhivanie rabochego mesta i podgotovitel'no-zaklyuchitel'nogo dlya tekhnicheskogo normirovaniya stanochnyh rabot. Seriya 1. – M.: NIItruda, 1991. – 168 s.

Vicktor Vasiliev, Doctor of Technics, Professor. E-mail: vasiliev1952va@yandex.ru
Elena Postnikova, Candidate of Technics, Associate Professor Department of Economics and Organization of Production. E-mail: postnikova.el@bmstu.ru
Svetlana Aleksandrova, Candidate of Technics, Associate Professor Department. E-mail: vasil-s@yandex.ru
Natalia Yarotskaya, Postgraduate Student. E-mail: yarotskayana@student.bmstu.ru