



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков

Вадим Скиба<sup>а, \*</sup>

Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

<sup>а</sup> <http://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, [skeeba\\_vadim@mail.ru](mailto:skeeba_vadim@mail.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.06(07): 621.785(787)

#### История статьи:

Поступила: 15 ноября 2018  
 Рецензирование: 17 января 2019  
 Принята к печати: 05 апреля 2019  
 Доступно онлайн: 15 июня 2019

#### Ключевые слова:

Гибридное оборудование  
 Концептуальное проектирование  
 Механическая обработка  
 Резание  
 Поверхностная закалка

#### Финансирование:

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, код проекта: 9.11829.2018/11.12.

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Процесс создания нового технологического оборудования начинается с разработки технического предложения – общей концепции объекта проектирования. Кроме сложности самой задачи, не вызывает сомнений тот факт, что ошибки, допущенные на ранних стадиях проектирования, приводят в дальнейшем к резкому увеличению трудозатрат на их исправление. Разработка концепции будущего гибридного технологического оборудования – это трудноформализуемая задача. Неоспоримым достоинством многофункциональных станочных комплексов является их способность изменять свойства поверхности изделия и интегрировать в себе разного рода воздействия на материал данного изделия в процессе формообразования. При этом появляется большая вероятность того, что при взаимодействии интегрируемых подсистем и компонентов возникнут проблемы их совместимости, которые зависят от множества условий и факторов, таких как особенности решения пространственно-траекторных задач, способы обеспечения точности формообразования, гармонизация основных характеристик станочного комплекса и конструктивно-компоновочной сложности системы в целом. *Цель работы:* на основе структурного синтеза формообразующих систем станочного оборудования и прогнозирования их технических характеристик повысить эффективность начальных этапов проектирования гибридных металлообрабатывающих комплексов. **Методы.** Теоретические исследования выполнены с использованием основных положений системного анализа, геометрической теории формирования поверхностей, конструирования металлообрабатывающих станков, методов конечных элементов, математического и компьютерного моделирования. **Результаты и обсуждение.** Представлена оригинальная методика проведения структурно-кинематического анализа для предпроектных исследований гибридного металлообрабатывающего оборудования. Теоретическими исследованиями было установлено, что эффективность проектирования гибридных металлообрабатывающих систем может быть повышена в 6,092...18,297 раз применением методологии предпроектных исследований. Произведена апробация разработанной методики проектирования и предложена схема реализации гибридного металлообрабатывающего технологического оборудования. Использование предлагаемого гибридного станка может повысить эффективность металлообработки в целом: существенно повысится производительность изготовления деталей машин за счет реализации процессов поверхностной закалки методом высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты и механической обработки от одной технологической базы без промежуточных переустановок детали и инструментов.

**Для цитирования:** Скиба В.Ю. Гибридное технологическое оборудование: повышение эффективности ранних стадий проектирования комплексированных металлообрабатывающих станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 62–83. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83.

## Введение

Повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции невозможно без достижения высоких показателей ресурсо- и энергосбереже-

ния при обеспечении современными станочными системами должного уровня производственной гибкости в совокупности с гарантированно высокими значениями производительности обработки и требуемым уровнем качества изготовления деталей.

Выпуск высокоэффективного технологического оборудования является одним из основных путей развития современного машиностроения. Вследствие этого в станкостроении наметилась

#### \*Адрес для переписки

Скиба Вадим Юрьевич, к.т.н., доцент  
 Новосибирский государственный технический университет,  
 пр. К. Маркса, 20,  
 г. Новосибирск, 630073, Россия  
 Тел.: 8 (383) 346-17-79, e-mail: [skeeba\\_vadim@mail.ru](mailto:skeeba_vadim@mail.ru)

тенденция к проектированию и изготовлению гибридных металлообрабатывающих систем [1–9], построенных по принципу полифункциональной интеграции: усложнение ряда компонентов технологии и средств оснащения (например, структуры и состава операций); повышение энергоемкости процесса металлообработки; расширение диапазона выполняемых функций одного рабочего; рост количества функциональных модулей в системе контроля и управления процессом [10–18].

Тенденция к интеграции нескольких технологических процессов на одном металлообрабатывающем оборудовании (например, точение–закалка–шлифование; резание–закалка; абразивное шлифование–поверхностная закалка [5, 8, 12–19]) вызвано стремлением разработчи-

ков к увеличению технологического потенциала станков [2, 3, 6, 7, 16], а также возможностью обеспечения автономной работы гибридного станка в условиях гибкого машиностроительного производства. Очевидно, что это приведет к сокращению станочного парка и, как следствие, к уменьшению производственных площадей, предусмотренных для размещения технологического оборудования. Кроме того, уменьшатся и затраты ресурсов на выполнение той или иной производственной задачи. Такая замена маршрутной технологической цепочки станочными комплексами будет способствовать существенному сокращению производственного цикла изготовления деталей машин (рис. 1).

Процесс создания нового технологического оборудования начинается с разработки техниче-

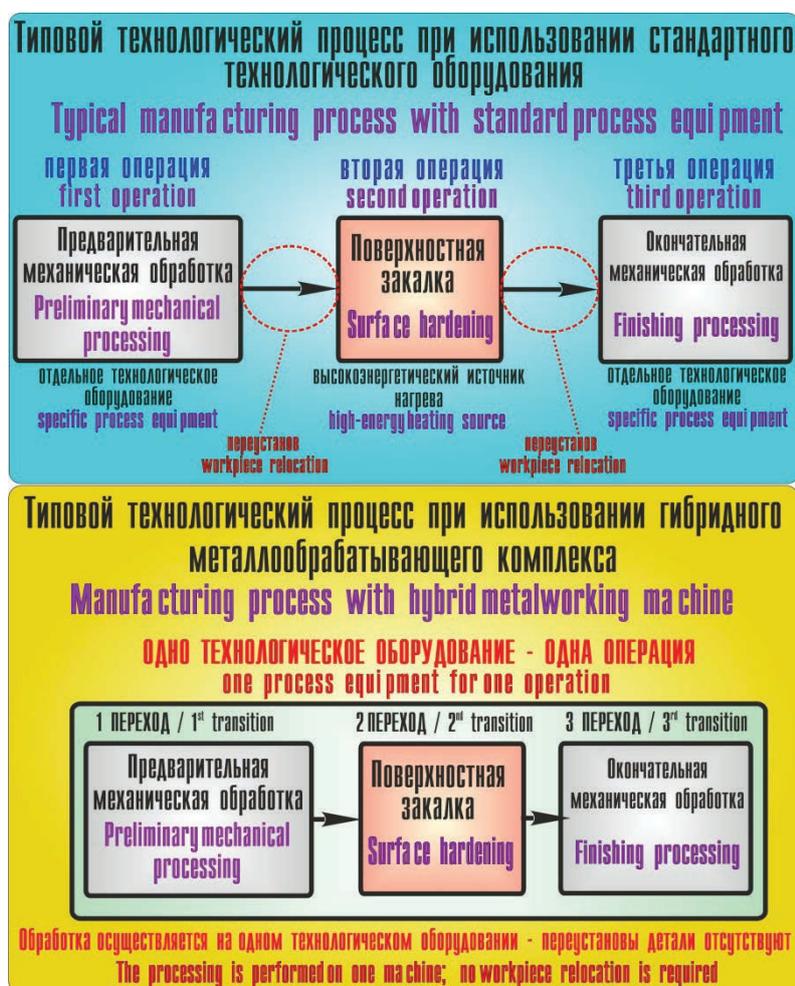


Рис. 1. Типовой технологический процесс и технологический процесс при использовании гибридного металлообрабатывающего оборудования

Fig. 1. Typical manufacturing process and manufacturing process with hybrid metalworking equipment

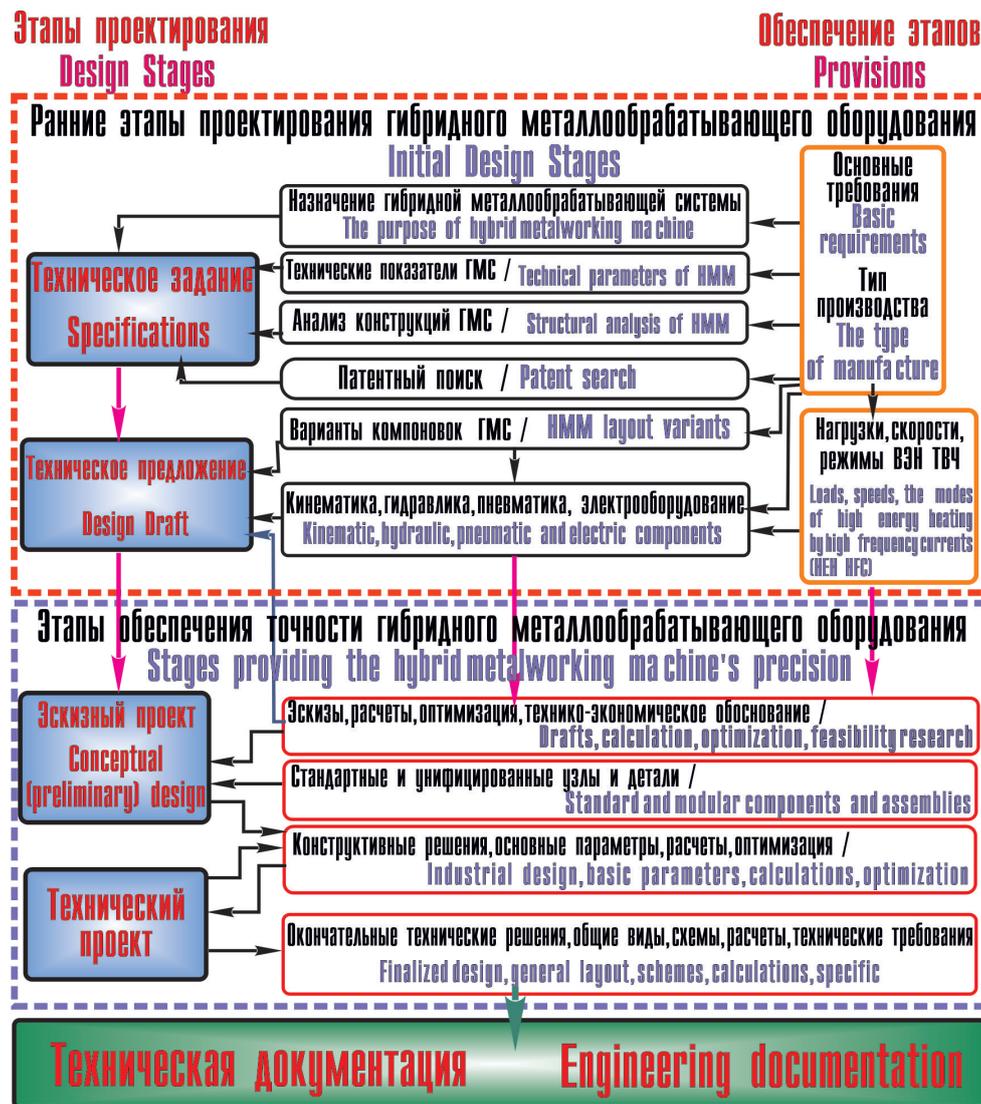


Рис. 2. Этапы проектирования гибридных металлообрабатывающих систем

Fig.2. Design stages of hybrid metalworking systems

ского предложения – общей концепции объекта проектирования (рис. 2). Именно здесь решается ряд важных первоочередных задач, прежде всего это выполнение структурного синтеза (формирование структуры гибридной металлообрабатывающей системы – определение составляющих ее элементов и связей между ними) и обоснование рациональных значений технических характеристик интегрального оборудования, отражающих его технологические возможности, металло- и энергоемкость, эргономичность и т. п.

Рассматриваемый этап очень важен с экономической точки зрения, так как именно при проведении предпроектного эксперимента, разработке технического задания и технического предложения решается вопрос основной части

затрат (до 80 %) на создание и эксплуатацию разрабатываемого оборудования [20–27]. Важность ответственного подхода к проектной деятельности на данной стадии вызвана еще и тем, что исправление ошибок, допущенных на этом этапе проектирования оборудования, требует значительных трудозатрат [27–34].

*Цель работы:* на основе структурного синтеза формообразующих систем станочного оборудования и прогнозирования их технических характеристик повысить эффективность начальных этапов проектирования гибридных металлообрабатывающих комплексов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Предложить методику структурного анализа, позволяющую эффективно выполнять пред-

проектные исследования при разработке гибридного металлообрабатывающего оборудования.

2. Осуществить обоснованный выбор источника энергии высокой концентрации, которым будет оснащаться проектируемое гибридное металлообрабатывающее оборудование. Провести серию натурных экспериментов с целью определения рационального диапазона варьирования удельных мощностей высокоэнергетического источника.

3. Разработать, спроектировать и апробировать технологию изготовления оборудования, оснастки и инструмента для гибридного станка. Представить схему реализации гибридного металлообрабатывающего технологического оборудования

### Методика исследований

Для определения исполнительных движений гибридной металлообрабатывающей системы (ГМС) и требуемого количества их настраиваемых параметров использовались основные положения структурно-кинематического синтеза металлорежущих станков [35–37]. Исследования возможного структурного состава и компоновки ГМС при интеграции механических и поверхностно-термических процессов производились с учетом основных положений структурного синтеза и компонетики металлообрабатывающих систем, представленных в работах [20, 25, 26, 38, 39].

Решению задачи определения эксплуатационных нагрузок металлообрабатывающих станков посвящено большое количество работ. Существует множество методов расчетов, в основном аналитического характера. Но при их применении нельзя говорить об абсолютной корректности результатов, так как они не позволяют учитывать большинства факторов и особенностей, оказывающих влияние на определяемые характеристики гибридных металлообрабатывающих станков непосредственно в реальных условиях эксплуатации. В статье предлагается универсальная методика обоснования технических характеристик комплексированного станочного оборудования на базе математического моделирования условий его эксплуатации.

Данная методика основывается на том, что эксплуатационные характеристики станков (частота вращения  $n$  (об/мин), крутящий момент на шпинделе  $T$  (Н · м) и эффективная мощность  $P$  (кВт)) образуют систему случайных величин, взаимосвязанных между собой и зависящих от

множества факторов, действующих как аддитивно, так и мультипликативно. К таким факторам прежде всего относятся режимные параметры технологических операций. Следовательно, для адекватного отражения специфических условий работы металлорежущего оборудования [40] математическую модель целесообразно создавать на основании принципа суперпозиций. В соответствии с данным принципом для системы эксплуатационных характеристик станков дифференциальная функция распределения будет иметь следующий вид:

$$f(x, y) = \sum_{q=1}^{\omega} p_q f_q(x, y), \quad (1)$$

где  $f_q(x, y)$  – дифференциальная функция элементарных (частных) распределений эксплуатационных характеристик  $x$  и  $y$ , соответствующих  $T$  и  $n$  для  $q$ -х условий обработки, при этом мощность  $P$  не входит в число аргументов данной функции, поскольку является производной от  $n$  и  $T$ ;  $p_q$  – вероятность работы станка в заданных условиях;  $\omega$  – число реализуемых на станке условий обработки.

Анализ большого количества результатов статистических исследований показал, что для некоторых условий обработки при определенных сочетаниях рассматриваемых технологических факторов описанные выше эксплуатационные характеристики могут быть выражены через логарифмически нормальный закон распределения. Тогда в выражении (1) заменим переменные  $x = \ln T$ ;  $y = \ln n$ , после чего функция  $f(x, y)$  будет представлять поверхность распределения. Необходимая исходная информация для построения данной функции либо берется из задания на проектирование станка, либо может быть получена на стадии прогнозирования технических характеристик оборудования [40, 41].

Анализируя выражение (1), приходим к выводу, что конечная картина дифференциальной функции распределения эксплуатационной характеристики формируется путем сложения частных функций с учетом их весовых коэффициентов. Более того, после построения картин распределений всех эксплуатационных характеристик можно определить наиболее рациональные значения каждой характеристики в отдельности, по сути, решая проблему начального этапа оптимизации. Поскольку на ранней стадии

проектирования за критерий оптимизации нельзя принять «*приведенные затраты*», то необходимо прибегнуть к анализу характера изменения моделируемой зависимости (1), для чего лучше всего подходит ее вторая производная

$$f''(x, y) = \sum_{q=1}^{\omega} p_q f_q''(x, y), \quad (2)$$

в которой

$$f_q''(x, y) = -\frac{1-t_q^2}{\sigma_q^3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t_q^2}{2}} \text{ при } t_q = \frac{x-E_q}{\sigma_q}, \quad (3)$$

где  $t_q$  – нормированное отклонение;  $\sigma_q$  – среднее квадратическое отклонение логарифмов случайной величины;  $E_q$  – математическое ожидание.

В этом случае задача оптимизации по существу сводится к установлению экстремумов целевой функции  $f''(x, y) \rightarrow \max$ . На завершающем этапе оптимизации необходимо перейти к комплексному анализу полученной системы распределений эксплуатационных характеристик и определению уже на базе его результатов значений технических характеристик. Частота вращения  $n$ , крутящий момент  $T$  на шпинделе, мощность резания  $P$ , связанные между собой общепринятым в машиностроении выражением  $P = Tn/9554$ , образуют систему случайных величин, описываемых функцией

$$f(\ln T, \ln n) = \sum_{q=1}^{\omega} p_q f_q(\ln T, \ln n). \quad (4)$$

Плотность элементарных логнормальных распределений  $f_q(\ln T, \ln n)$  системы взаимозависимых случайных величин выражается формулой

$$f_q(\ln T, \ln n) = \frac{1}{2\pi\sigma_{\ln T} \sigma_{\ln n} \sqrt{1-R_q^2}} e^{-\alpha}$$

при

$$\alpha = \frac{1}{2(1-R_q^2)} \left[ \frac{(\ln T - E_{\ln T_q})^2}{\sigma_{\ln T_q}^2} - 2 \ln \frac{2R_q(\ln T - E_{\ln T_q})(\ln n - E_{\ln n_q}) + (\ln n - E_{\ln n_q})^2}{\sigma_{\ln T_q} \sigma_{\ln n_q}} \right], \quad (5)$$

где  $R_q$  – коэффициент корреляции случайных величин  $\ln T$  и  $\ln n$ .

Однако для исследования нагрузок, действующих на отдельные элементы привода, вместо поверхности более целесообразно использовать картину распределения эксплуатационных характеристик, которая представляет собой семейство кривых равной плотности (линий равной вероятности). Она формируется путем сечения поверхности  $f(x, y)$  рядом плоскостей, параллельных горизонтальной плоскости, и проецирования полученных кривых на эту плоскость.

Последовательным интегрированием функции  $f(x, y)$  внутри некоторой области  $S$ , ограниченной рамками  $ABCDE$  значений характеристик (рис. 3), можно найти вероятности  $p_{ij}$  условий работы станка для всех сочетаний  $n_i$  и  $T_j$ , а также соответствующей им мощности  $P_{ij}$ . Причем вероятность попадания точки с координатами  $x_i$  и  $y_j$  в элементарную область  $\Delta S$

$$p_{ij} [(x, y) \in \Delta S] = \iint_{\Delta S} f(x, y) dx dy. \quad (6)$$

Нахождение объема работ, выполняемых на станке с максимальной производительностью, определяется посредством суммирования этих вероятностей по всей области  $S$ . При необходимости осуществляется корректировка положения границ, а следовательно, и значений эксплуатационных характеристик (изменение положения границ обусловлено также потребностью в увяз-

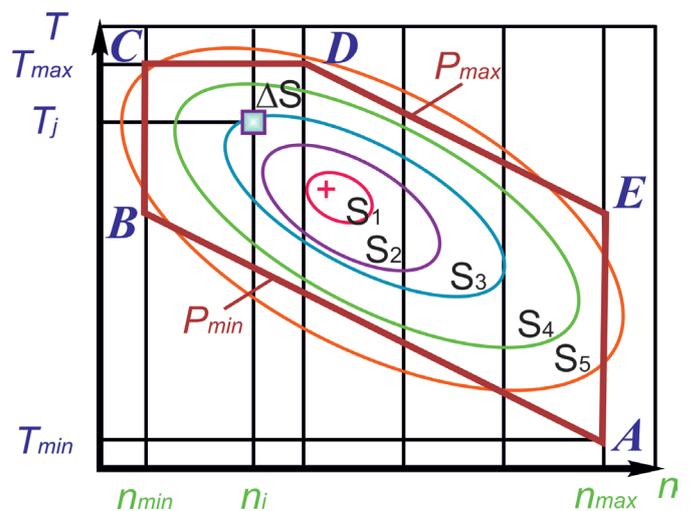


Рис. 3. Картина распределения эксплуатационных характеристик станка

Fig. 3. The distribution pattern of the machine operational characteristics

ке значений  $n$  с рядом предпочтительных чисел и округлением значений  $T$ ).

Полученные таким образом значения вероятностей реализации характеристик  $n_i$  и  $T_j$  могут служить в дальнейшем для вычисления эквивалентной нагрузки, действующей на любой проектируемый элемент привода.

### Результаты и их обсуждение

В работе представлен вариант реализации предпроектных исследований на примере проектирования гибридной металлообрабатывающей системы, предназначенной для интегральной обработки детали типа «Вал» (рис. 4).

Конструктор на предварительном этапе выполняет построение в параметрическом виде 3D-модели изделия и сохраняет ее в любой из следующих форматов представления графической информации: parasolid (\*.x\_t); IGES (\*.igs);

STEP (\*.step, \*.stp). Далее происходит формирование базы данных: указываются поверхности, подлежащие формообразованию на каждом из основных переходов (предварительная механическая обработка, поверхностная закалка ВЭН ТВЧ, чистовая механическая обработка); предельные значения изменения геометрических параметров вала; качество точности, волнистость и шероховатость обрабатываемых поверхностей, а также глубина закалки поверхностно-упрочняемых участков детали; марки конструкционных материалов, из которых предполагается изготавливать деталь; система управления (ручное или ЧПУ); тип производства и т. д.

Система на основе полученных данных алгоритмами метода моделирования процессов формообразования поверхностей [27] производит многокритериальный синтез гибридной металлорежущей системы с установлением наиболее рациональной совокупности методов размерной

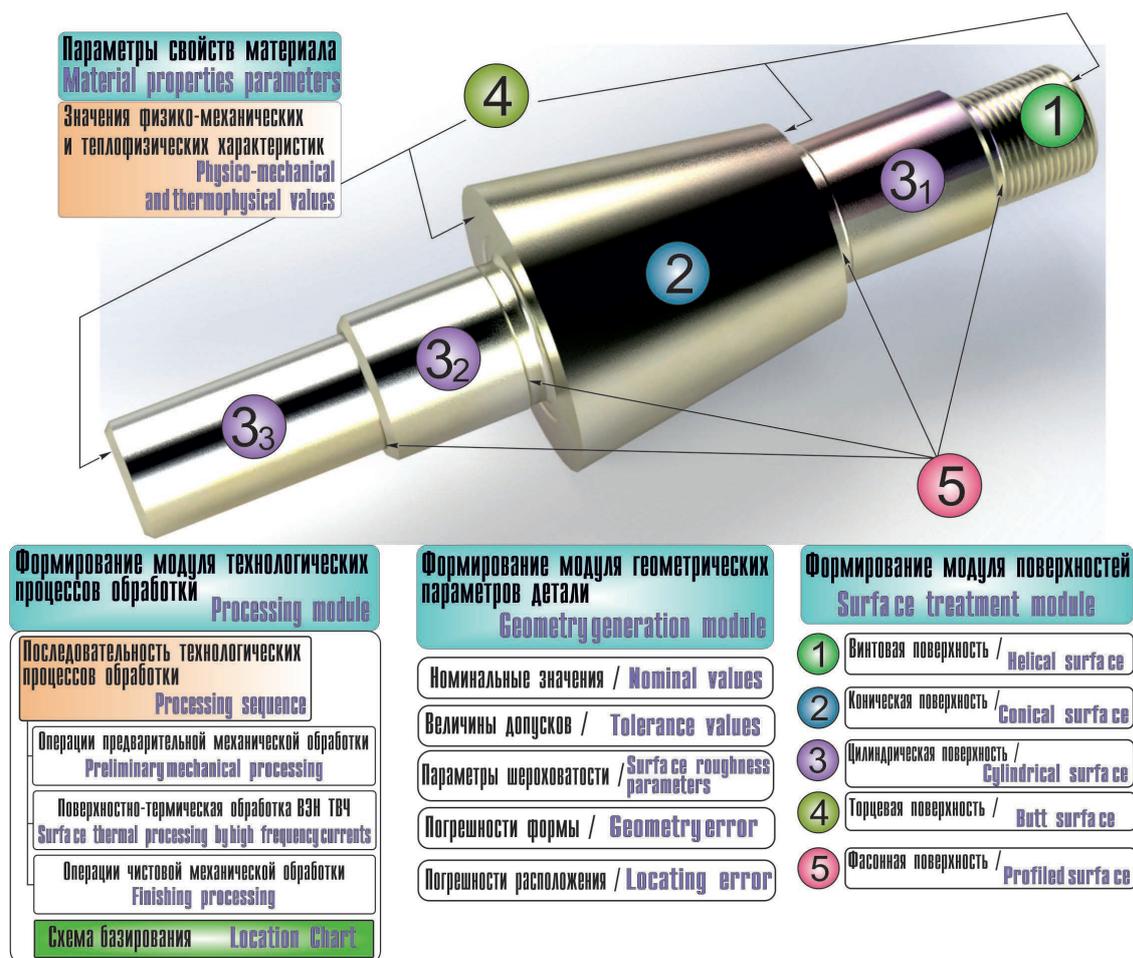


Рис. 4. Разложение обрабатываемой детали типа «Вал» на элементарные поверхности

Fig. 4. Breaking down the shaft-type workpiece into elementary surfaces

и поверхностно-термической обработки для детали в целом.

Альтернативными вариантами процессов формообразования элементарных поверхностей служат точение, фрезерование и шлифование. Поскольку весь комплекс механических (черновые и чистовые) и поверхностно-термических операций предполагается осуществить за один установ детали, то шлифование, в силу рационального использования данной операции на чистовых переходах, в дальнейшем анализе не рассматривалось. С учетом особенностей геометрии типовой детали, в частности соотношения между диаметром и длиной обрабатываемого объекта, было определено, что ось шпинделя в пространстве должна занимать горизонтальное положение.

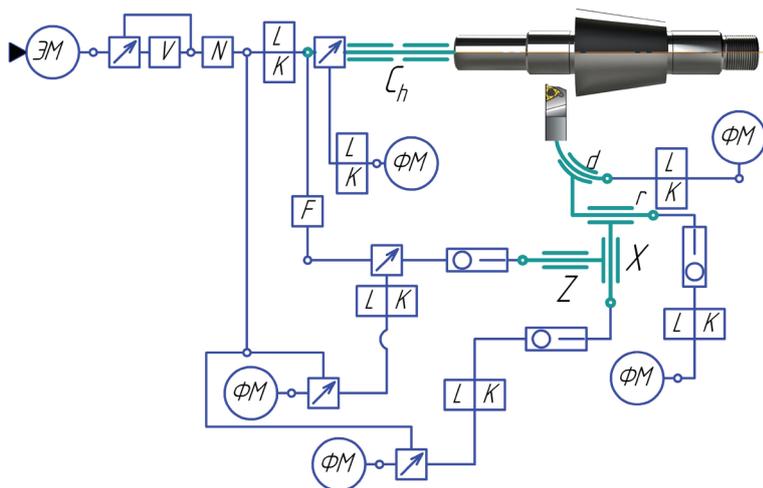
При синтезе гибридной металлообрабатывающей системы на основе использования схемы фрезерования элементарных поверхностей, например при использовании дисковых фрез, необходимы следующие элементарные движения: вращение шпинделя с режущим инструментом  $C$ , продольное  $Z$  и поперечное  $X$  перемещение фрезерного суппорта и вращательное движение заготовки  $D$ . При синтезе ГМС на основе токарной схемы для обеспечения процесса формообразования и формирования требуемых размеров, кроме вращательного движения шпинделя с заготовкой  $C$ , необходимы продольное  $Z$  и поперечное  $X$  перемещение инструментов. Сравнивая между собой структурные формулы компоновок  $D_h 0 Z X C_h$  (фрезерование: количество структурных вариантов только при реализации механических операций составляет  $5! = 120$ ) и  $C_h 0 Z X$  (точение: количество структурных вариантов только при реализации механических операций составляет  $4! = 24$ ), приходим к выводу, реализация ГМС по токарной схеме конструктивно проще в реализации. Таким образом, на данном этапе системой было определено минимально необходимое количество элементарных движений узлов гибридной металлообрабатывающей системы. Затем в зависимости от функционального назначения определяется требуемое количество исполнительных движений (ИД) и их состав: формообразующие, установочные, движения деления, вспомогательные или управления.

На рис. 5 представлены частные структурные формулы компоновок в совокупности со

структурно-кинематическими схемами (СКС) для каждой в отдельности обрабатываемой поверхности и метода обработки. При генерации СКС система также старается найти рациональное решение при построении кинематических групп исполнительных движений: 1) точка подключения внешней связи к внутренней должна находиться как можно ближе к тому рабочему органу, движение которого осуществляется с большей скоростью и требует повышенного расхода мощности, при этом основной поток мощности не должен проходить через орган настройки траектории, поскольку будет снижена точность образования формы поверхности и усложнена конструкция блока; 2) длина внутренней связи (кинематической цепи) в сложных ИД должна быть минимальной, поскольку внутренняя связь отвечает за траекторию движения; 3) органы настройки остальных параметров ИД (скорости  $V$ , направления  $N$ , пути  $L$  и конечной точки  $K$ ) необходимо устанавливать во внешних связях; 4) каждый параметр ИД целесообразно настраивать только одним органом так, чтобы перестройка любого параметра не вызывала подналадки других [42].

Синтез СКС для выбранных методов обработки заданных поверхностей детали является тем этапом, на котором анализируются полученные результаты и принятые решения, что позволяет своевременно провести необходимые корректировки и уточнения. На этой стадии необходимо конкретизировать тип устройств, так как условные обозначения элементов СКС подразумевают широкий спектр механизмов с определенными достоинствами и недостатками, способных выполнять ту или иную заданную функцию. С этой точки зрения оптимизация СКС дает возможность принять ряд рациональных решений: выбрать наиболее выгодное сочетание органов исполнительных движений, разнесенных по времени, сократить количество кинематических цепей и источников энергии и т. д. [42]. Для более точной проработки СКС необходима информация о рациональных технических характеристиках будущего гибридного металлообрабатывающего оборудования.

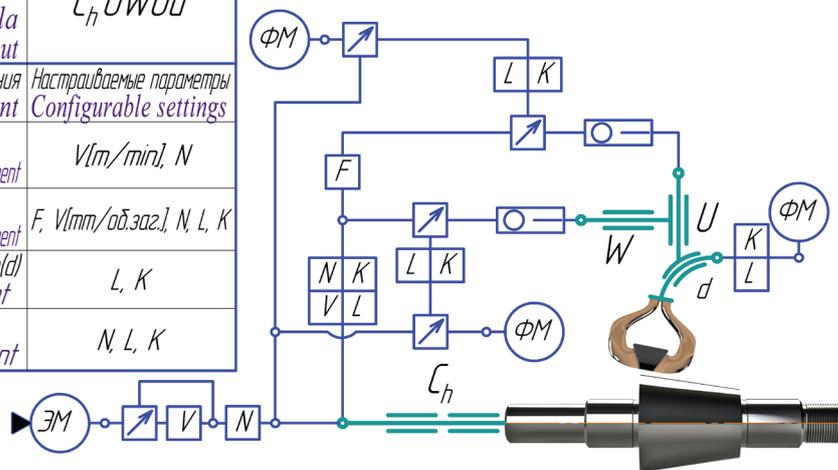
При проектировании интегрального оборудования предполагается реализовать на одном из технологических переходов гибридного станка метод высокоэнергетического нагрева токами



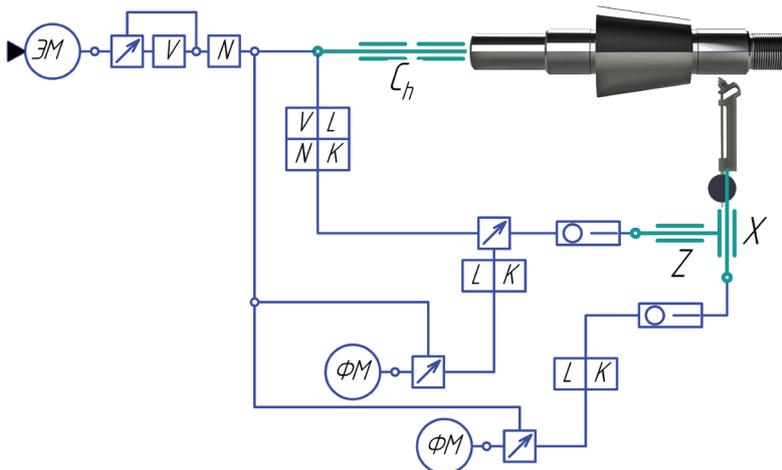
Структурная формула компоновки станка Structural formula of the machine layout	$C_h OZXrd$
Исполнительные движения Actuating movement	Настраиваемые параметры Configurable settings
$\Phi_V(C_h, Z)$ geometry generation movement	$F, V(\text{m}/\text{min}), N, L, K$
$Усм(X), Усм(d)$ setting movement	$L, K$
$\Delta(C_h), \Delta(r)$ indexing movement	$L, K$
$Всп(Z), Всп(X)$ auxiliary movement	$N, L, K$

a

Структурная формула компоновки станка Structural formula of the machine layout	$C_h OWUd$
Исполнительные движения Actuating movement	Настраиваемые параметры Configurable settings
$\Phi_V(C_h)$ geometry generation movement	$V(\text{m}/\text{min}), N$
$\Phi_S(WU)$ geometry generation movement	$F, V(\text{mm}/\text{од.эаз.}), N, L, K$
$Усм(W), Усм(U), Усм(d)$ setting movement	$L, K$
$Всп(W), Всп(U)$ auxiliary movement	$N, L, K$



b



Структурная формула компоновки станка Structural formula of the machine layout	$C_h OZX$
Исполнительные движения Actuating movement	Настраиваемые параметры Configurable settings
$\Phi_V(C_h)$ geometry generation movement	$V(\text{m}/\text{min}), N$
$\Phi_S(Z)$ geometry generation movement	$V(\text{mm}/\text{од.эаз.}), N, L, K$
$Усм(X)$ setting movement	$L, K$
$\Delta(Z)$ indexing movement	$L, K$
$Всп(Z), Всп(X)$ auxiliary movement	$N, L, K$

в

Рис. 5. Структурно-кинематические схемы при механической обработке:  
а – нарезание резьбы резцом; б – упрочнение конической поверхности; в – алмазное выглаживание цилиндрической поверхности

Fig. 5. Structural kinematic schemes for machining:  
a – thread cutting; б – conical surface hardening; в – diamond smoothing of the cylindrical surface

высокой частоты (ВЭН ТВЧ). Более того, областью наших интересов является поверхностная закалка стальных деталей с глубиной упрочнения порядка  $h = 1$  мм. Вследствие этого эффективная реализация ВЭН ТВЧ в этих условиях возможна на частотах уровня  $\omega = 400 \dots 440$  кГц, поскольку при данном факторе глубина проникновения тока в стальные изделия составляет  $0,6 \dots 0,8$  мм. Моделирование технических характеристик гибридного металлообрабатывающего оборудования показало, что для обеспечения сравнимого с механическими операциями уровня производительности формообразования необходимо осуществлять обработку ВЭН ТВЧ на скоростях порядка  $V_{и} \in [50, 100]$  мм/с. Проведение натурных экспериментов позволило определить диапазон удельных мощностей источника  $q_{и}(h, V_{и})$ , с которыми требуется производить обработку ВЭН ТВЧ:  $q_{и} \in [1,5; 4,0] \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>. В связи с тем, что процесс ВЭН ТВЧ характеризуется большими удельными мощностями, конструкция индукторов существенно отличается от традиционных. Конфигурация индукторов достаточно многообразна, но с учетом особенностей реализации высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты в качестве инструмента на операции термоупрочнения предпочтительнее использовать плоский индуктор петлевого типа, оснащенного магнитопроводом (рис. 6). Длина магнитопровода определяется как формой и размерами обрабатываемого участка детали, так и требуемой величиной удельной мощности в зоне нагрева. В большинстве своем использование индуктора указанной конструкции обеспечивает локализо-

ванный участок нагрева. Габаритные размеры указанного участка зависят как от длины ферритового магнитопровода, так и от ширины активного провода индуктора. Чтобы обеспечить отвод необходимого количества теплоты и избежать опасности перегорания активного провода индуктора, необходимо обеспечить толщину его стенок в пределах  $(1 \dots 1,4)\delta_M$ . Так, например,  $\delta_M$  – глубина проникновения тока – для меди при частоте тока 440 кГц будет составлять 0,11 мм, тогда для снижения суммарной мощности на индукторе ширина его активного провода должна быть минимальной, т. е. составлять 1...2 мм. Длина активного провода индуктора с учетом трудоемкости технологии изготовления, а также критерия реализации типовых формообразующих движений при поверхностной закалке выполняется порядком 10 мм. Соответственно максимальная площадь зоны активного провода индуктора равна 20 мм<sup>2</sup>. Принимая во внимание, что

$$q_{и} = N_{ТВЧуст} \eta_{ТВЧуст} / A,$$

где  $N_{ТВЧуст}$  – мощность ТВЧ установки;  $\eta_{ТВЧуст}$  – коэффициент полезного действия ТВЧ установки (для генераторов тиристорного типа  $\eta_{ТВЧуст} \approx 0,97$ );  $A$  – площадь зоны активного провода индуктора, максимальная мощность генератора токов высокой частоты равна

$$N_{max} = 4,0 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2 \times \\ \times 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / 0,97 \approx 8,25 \text{ кВт.}$$



Рис. 6. Эффективная зона нагрева у индукторов различной конструкции при поверхностной закалке ТВЧ

Fig. 6. Effective heating zone for the various design inductors during surface hardening by high frequency currents

С учетом современного уровня развития микропроцессорной техники в области высокочастотных промышленных установок тиристорного типа, а также критериев удобоваримого встраивания в гибридную станочную систему в область наших интересов будут входить высокочастотные генераторы типа СВЧ-10 мощностью 10 кВт.

На завершающем этапе на базе частных структурно-кинематических схем производится синтез обобщенной кинематической структуры проектируемой гибридной металлообрабатывающей системы. Синтез обобщенной СКС может производиться по схеме агрегатного построения компоновки. При этом методе формулу компоновки можно представить в следующем виде:  $[C_{h\nu}0] \{[0ZXrd] + [0WUd]\}$ . Один из возможных вариантов реализации структурно-кинематической схемы представлен на рис. 7. Анализируя представленную схему, отметим достаточную трудоемкость в реализации данного варианта гибридной системы: большое количество кинематических цепей и органов настройки параметров исполнительных движений и т. д. Решением данной проблемы является построение металлообрабатывающей системы по модульной схеме, при которой становится возможным совместное использование максимального количества базовых узлов оборудования и органов настройки параметров ИД на механических и поверхностно-термических операциях. При таком методе формула компоновки может иметь вид: 1)  $C_h0Z(Xrd + WUd)$  (рис. 8); 2)  $C_h0Z(Xrd + Ud)$  (рис. 9); 3)  $Ch0ZX(rd + d)$  (рис. 10). В этих формулах строчными буквами обозначены установочные блоки: поворотные салазки суппорта, поворотный резцедержатель и поворот индуктора. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки и требует оптимизации на последующих этапах проектирования.

Рассмотрим выполнение оценки изменения эффективности проектирования гибридной металлообрабатывающей системы с горизонтальной/

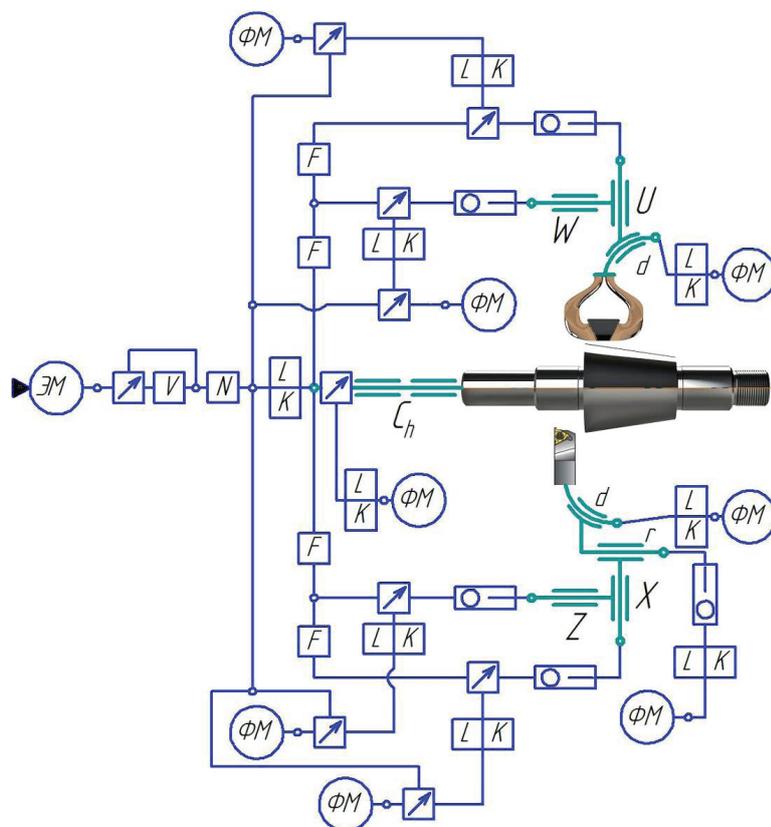


Рис. 7. Структурно-кинематическая схема гибридной металлообрабатывающей системы – структурная формула  $[C_h0] \{[0ZXrd] + [0WUd]\}$

Fig. 7. Structural kinematic scheme of the hybrid metalworking system: the structural formula is  $[C_h0] \{[0ZXrd] [0WUd]\}$

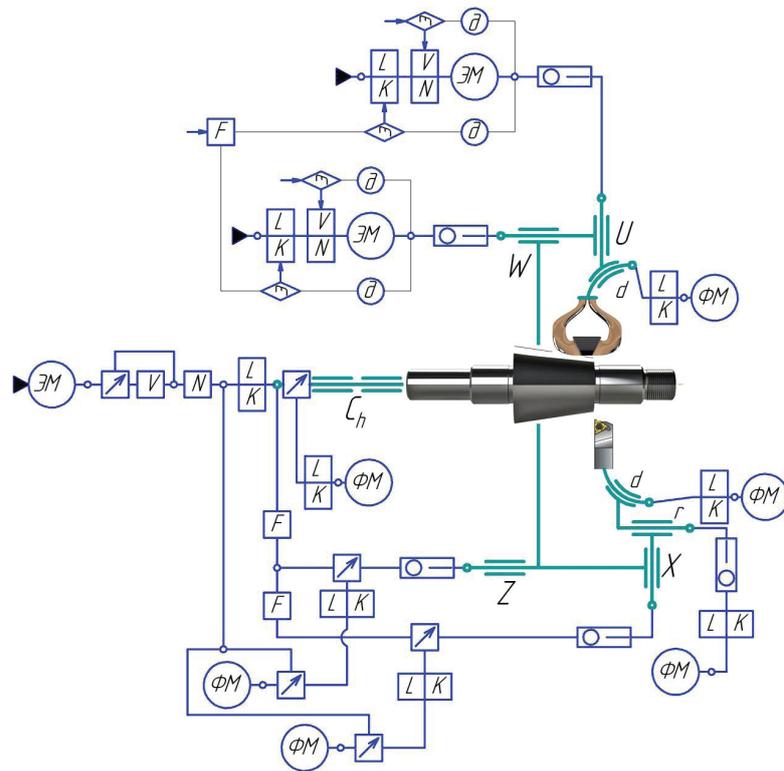


Рис. 8. Структурно-кинематическая схема гибридной металлообрабатывающей системы – структурная формула  $C_h 0Z(Xrd + WUd)$

Fig. 8. Structural kinematic scheme of the hybrid metalworking system: the structural formula is  $C_h 0Z(Xrd + WUd)$

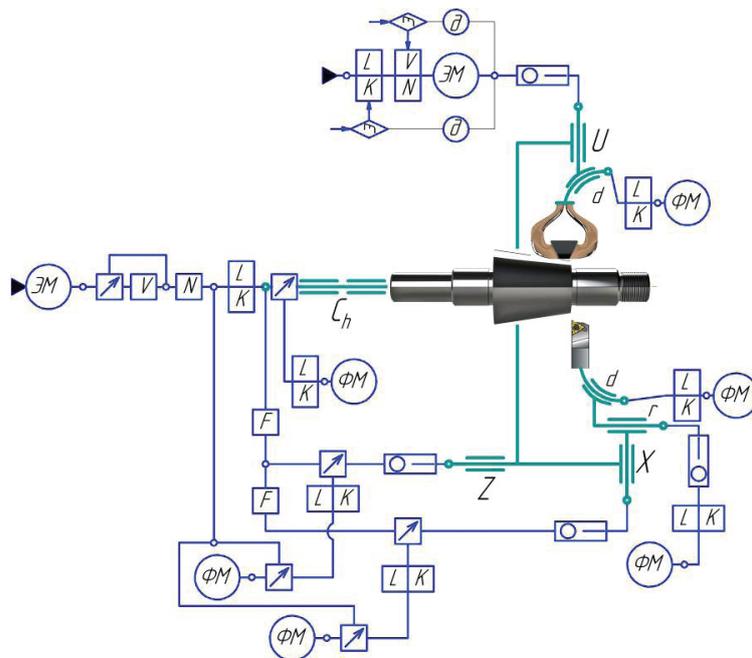


Рис. 9. Структурно-кинематическая схема гибридной металлообрабатывающей системы – структурная формула  $C_h 0Z(Xrd + Ud)$

Fig. 9. Structural kinematic scheme of the hybrid metalworking system: the structural formula is  $C_h 0Z(Xrd + Ud)$

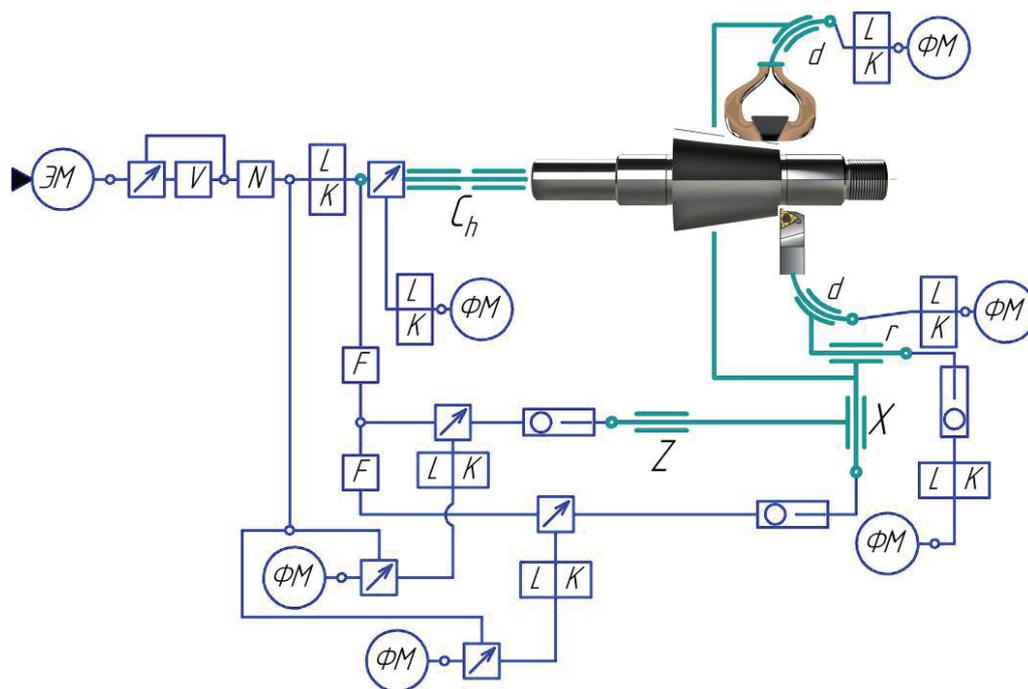


Рис. 10. Структурно-кинематическая схема гибридной металлообрабатывающей системы – структурная формула  $C_h 0ZX(rd + d)$

Fig. 10. Structural kinematic scheme of the hybrid metalworking system: the structural formula is  $C_h 0ZX(rd + d)$

вертикальной осью вращения и горизонтальным/вертикальным расположением станины на стадии синтеза компоновки гибридной металло-

обрабатывающей системы. Все возможные варианты компоновок рассматриваемой ГМС приведены в таблице.

### Гибридная металлообрабатывающая система на базе распространенных компоновок токарных станков

#### Hybrid metalworking system based on common lathe layouts

Цепь формообразования при механической и поверхностно-термической обработке / Geometry generation sequence during mechanical and surface heat treatment		Компоновка гибридной металлообрабатывающей системы с учетом расположения станины / The layout of the hybrid metalworking system depending on the bed location			
№ п/п	Формула / Formula	$0k_1k_2k_3$	$k_10k_2k_3$	$k_1k_20k_3$	$k_1k_2k_30$
1	$C_h ZX$	$0C_h ZX$	$C_h 0ZX^*$	$C_h Z0X$	$C_h ZX0$
	$C_v ZX$	$0C_v ZX$	$C_v 0ZX^*$	$C_v Z0X$	$C_v ZX0$
2	$C_h XZ$	$0C_h XZ$	$C_h 0XZ$	$C_h X0Z$	$C_h XZ0$
	$C_v XZ$	$0C_v XZ$	$C_v 0XZ$	$C_v X0Z$	$C_v XZ0$
3	$ZC_h X$	$0ZC_h X$	$Z0C_h X$	$ZC_h 0X$	$ZC_h X0$
	$ZC_v X$	$0ZC_v X$	$Z0C_v X$	$ZC_v 0X$	$ZC_v X0$

Примечания: примеры реализации компоновок представлены на рис. 11 и 12

Notes: examples of the layouts implementation are shown in fig. 11 and 12

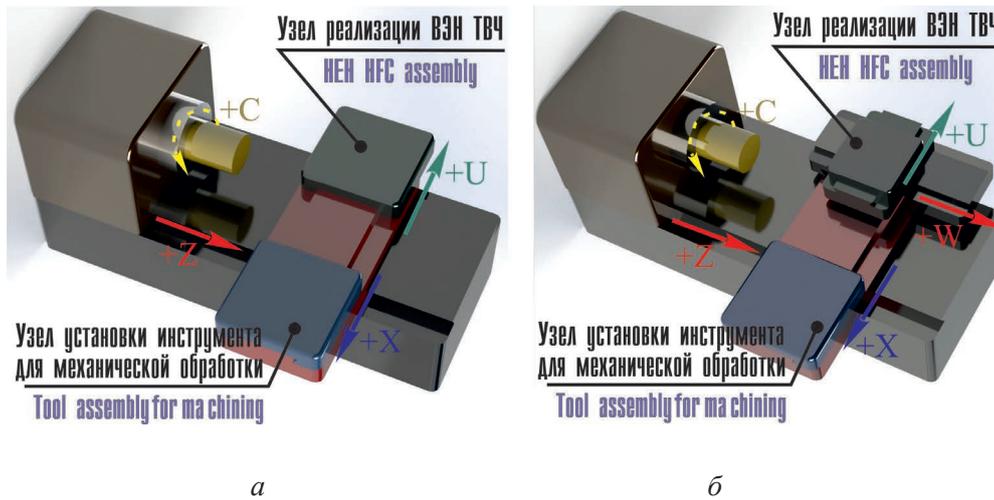


Рис. 11. Компонка гибридной металлообрабатывающей системы с горизонтальным расположением станины:

$$a - C_h 0Z(X + U); \quad б - C_h 0Z(X + WU)$$

Fig. 11. Layout of a hybrid metalworking system with a horizontal bed:

$$a - C_h 0Z(X + U); \quad б - C_h 0Z(X + WU)$$

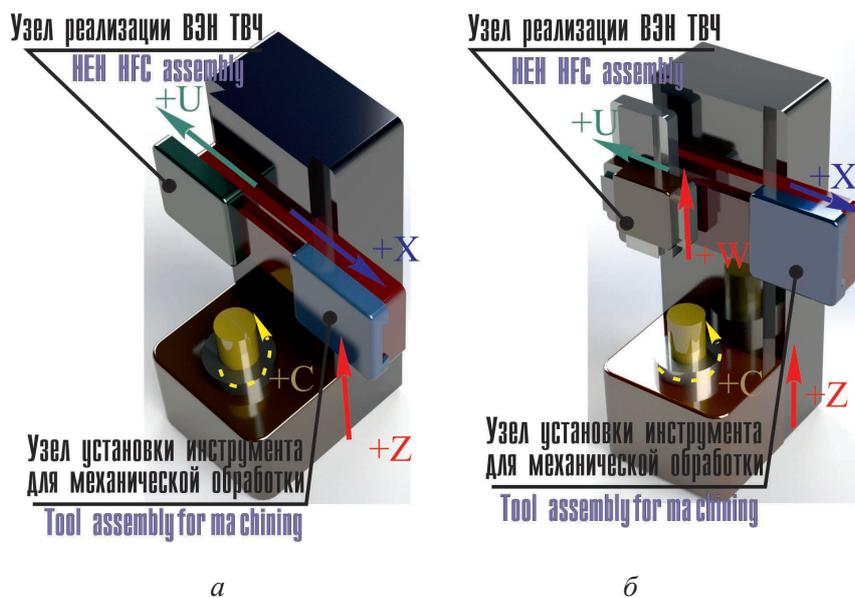


Рис. 12. Компонка гибридной металлообрабатывающей системы с вертикальным расположением станины:

$$a - C_v 0Z(X + U); \quad б - C_v 0Z(X + WU)$$

Fig. 12. Layout of a hybrid metalworking system with a horizontal bed:

$$a - C_v 0Z(X + U); \quad б - C_v 0Z(X + WU)$$

На рис. 13 представлена структура универсального множества вариантов компоновок гибридной металлообрабатывающей системы, при этом мощность такого отношения составит  $|U|=24$ . В случае, если для анализа будут оставлены только компоновки с горизонтальным или вертикальным расположением шпин-

деля, то мощность такого отношения составит  $|U|=12$ .

Неопределенность процесса проектирования металлообрабатывающей системы может быть выражена через энтропию данного процесса. По мере выполнения процесса проектирования растет объем получаемой о ГМС ин-

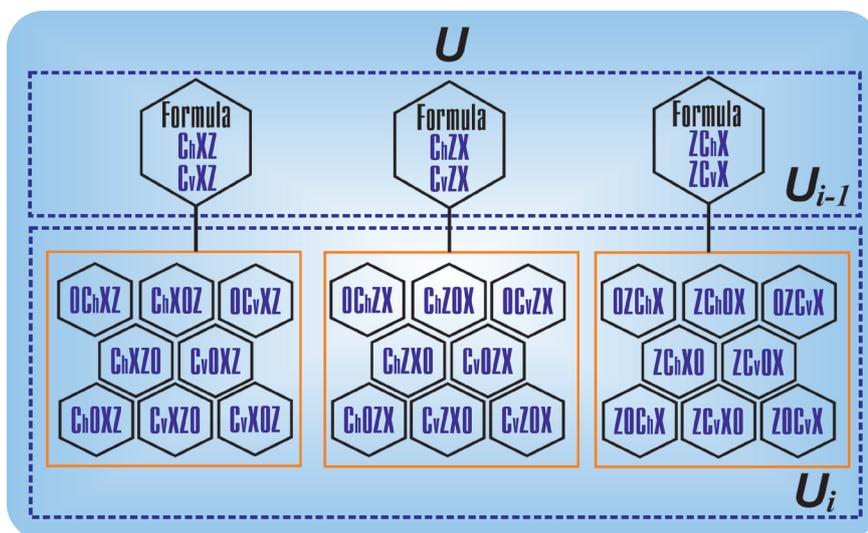


Рис. 13. Множество вариантов гибридной металлообрабатывающей системы на этапе синтеза его компоновок

Fig. 13. Variants of the hybrid metalworking system at the stage of its layouts synthesis

формации, следовательно, энтропия процесса сокращается.

Расчет энтропии такой сложной системы, как гибридная металлообрабатывающая система, можно осуществлять по формуле

$$H(U) = \ln(|U_{i-1}|) + \sum_{j=1}^{|U_{i-1}|} \ln(|U_i / U_{i-1,j}|).$$

Так как  $|U_{i-1}|=3$ , а  $|U_i / U_{i-1,1}|=8$ ,  $|U_i / U_{i-1,2}|=8$  и  $|U_i / U_{i-1,3}|=8$ , тогда

$$H(U)|_{|U|=24} = \ln(3) + \ln(8) + \ln(8) + \ln(8) = 7,337.$$

Соответственно решение только для горизонтальных или вертикальных компоновок даст следующий результат.

Так как  $|U_{i-1}|=3$ , а  $|U_i / U_{i-1,1}|=4$ ,  $|U_i / U_{i-1,2}|=4$  и  $|U_i / U_{i-1,3}|=4$ , то

$$H(U)|_{|U|=12} = \ln(3) + \ln(4) + \ln(4) + \ln(4) = 5,257.$$

Если взять за основу то, что конструктором на данном этапе проектирования будет рассмотрено по одному варианту компоновки для каждой формообразующей цепи из трех выбранных, а при этом будет использоваться традиционная методология, то получим:

для  $|U|=24$

$$H(U/R)|_{|U|=24} = \ln(3) + \ln(7) + \ln(7) + \ln(7) = 6,936;$$

для  $|U|=12$

$$H(U/R)|_{|U|=12} = \ln(3) + \ln(3) + \ln(3) + \ln(3) = 4,394.$$

По завершении данного этапа проектирования получаем величину информации о металлообрабатывающей системе, которая составляет:

для  $|U|=24$

$$I(R)|_{|U|=24} = H(U)|_{|U|=24} - H(U/R)|_{|U|=24} = 7,337 - 6,936 = 0,401;$$

для  $|U|=12$

$$I(R)|_{|U|=12} = H(U)|_{|U|=12} - H(U/R)|_{|U|=12} = 5,257 - 4,394 = 0,863.$$

Применение конструктором методологии предпроектных исследований на данной стадии проектирования дает ему возможность проработать все возможные варианты компоновки гибридной металлообрабатывающей системы, тогда будет  $H(U/R^*)=0$ . Соответственно:

для  $|U|=24$

$$I(R^*)|_{|U|=24} = H(U)|_{|U|=24} - H(U/R^*)|_{|U|=24} = 7,337;$$

для  $|U|=12$

$$I(R^*)|_{|U|=12} = H(U)|_{|U|=12} - H(U/R^*)|_{|U|=12} = 5,257.$$

Оценка эффективности проектирования может быть осуществлена путем сопоставления величины информации о гибридной металлообрабатывающей системе после осуществления процесса проектирования с использованием предлагаемой ( $I(R^*)$ ) и традиционной методологии ( $I(R)$ ):

$$E = \frac{I(R^*)}{I(R)}.$$

В соответствии с представленным выражением получим:

для  $|U|=24$

$$E|_{|U|=24} = \frac{I(R^*)|_{|U|=24}}{I(R)|_{|U|=24}} = \frac{7,337}{0,401} = 18,297;$$

для  $|U|=12$

$$E|_{|U|=12} = \frac{I(R^*)|_{|U|=12}}{I(R)|_{|U|=12}} = \frac{5,257}{0,863} = 6,092.$$

Полученный результат свидетельствует о том, что методология предпроектных исследований при применении ее на стадии синтеза компоновок в данном конкретном случае дает возможность увеличить эффективность проектирования в 6,092...18,297 раз.

Проведенный комплекс предпроектных исследований позволил в кратчайшие сроки подготовить рабочую документацию для реализации гибридного технологического оборудования, объединяющего механическую и поверхностно-термическую обработку.

Гибридный станок для интегрированной обработки деталей в виде тел вращения содержит установленное на передней части суппорта устройство для закрепления металлорежущих инструментов, высокочастотный генератор, питающий закалочный блок со сменным индуктором, средство перемещения закалочного блока

относительно обрабатываемых деталей, выполненное в виде установленного на задней части суппорта крестового стола с автономными приводами, причем закалочный блок со сменным индуктором установлен на крестовом столе (рис. 14).

Предлагаемая конструкция обеспечивает возможность установки обрабатываемой детали между режущими инструментами и закалочным блоком. Крестовый стол с автономными приводами даст возможность перемещения закалочного блока со сменным индуктором независимо от исполнительных движений режущих инструментов, установленных на передней части суппорта.

При такой компоновке процессы резания и поверхностной закалки могут осуществляться независимо друг от друга: одновременно или поочередно. При этом обработка осуществляется от одной технологической базы без промежуточных переустановов детали и инструментов, что позволяет уменьшить припуск на окончательную обработку. Уменьшение припусков и уменьшение времени на вспомогательные операции (за счет исключения промежуточных переустановов) позволяет существенно повысить производительность обработки деталей.

На рис. 14 представлен общий вид станка для интегрированной обработки деталей в виде тел вращения, который включает в себя: станину станка 1, на передней части суппорта 2 которого установлено устройство 3 для закрепления металлорежущих инструментов, закалочный блок 4 со сменным индуктором 5, высокочастотный генератор 6, питающий закалочный блок 4, средство перемещения закалочного блока относительно обрабатываемых деталей, выполненное в виде установленного на задней части суппорта 2 крестового стола 7 с автономными приводами, причем закалочный блок 4 со сменным индуктором 5 установлен на крестовом столе 7. Крестовый стол с автономными сервоприводами в продольном и поперечном направлении предназначен для осуществления исполнительных движений сменного индуктора 5 относительно обрабатываемой детали 8. Шпиндель 9 и центры 10 станка 1 обеспечивают закрепление и вращение обрабатываемой детали 8. В резцедержателе 3 суппорта 2 установлены режущие инструменты, используемые на операциях чернового, получистового, чистового точения и алмазного выглаживания.

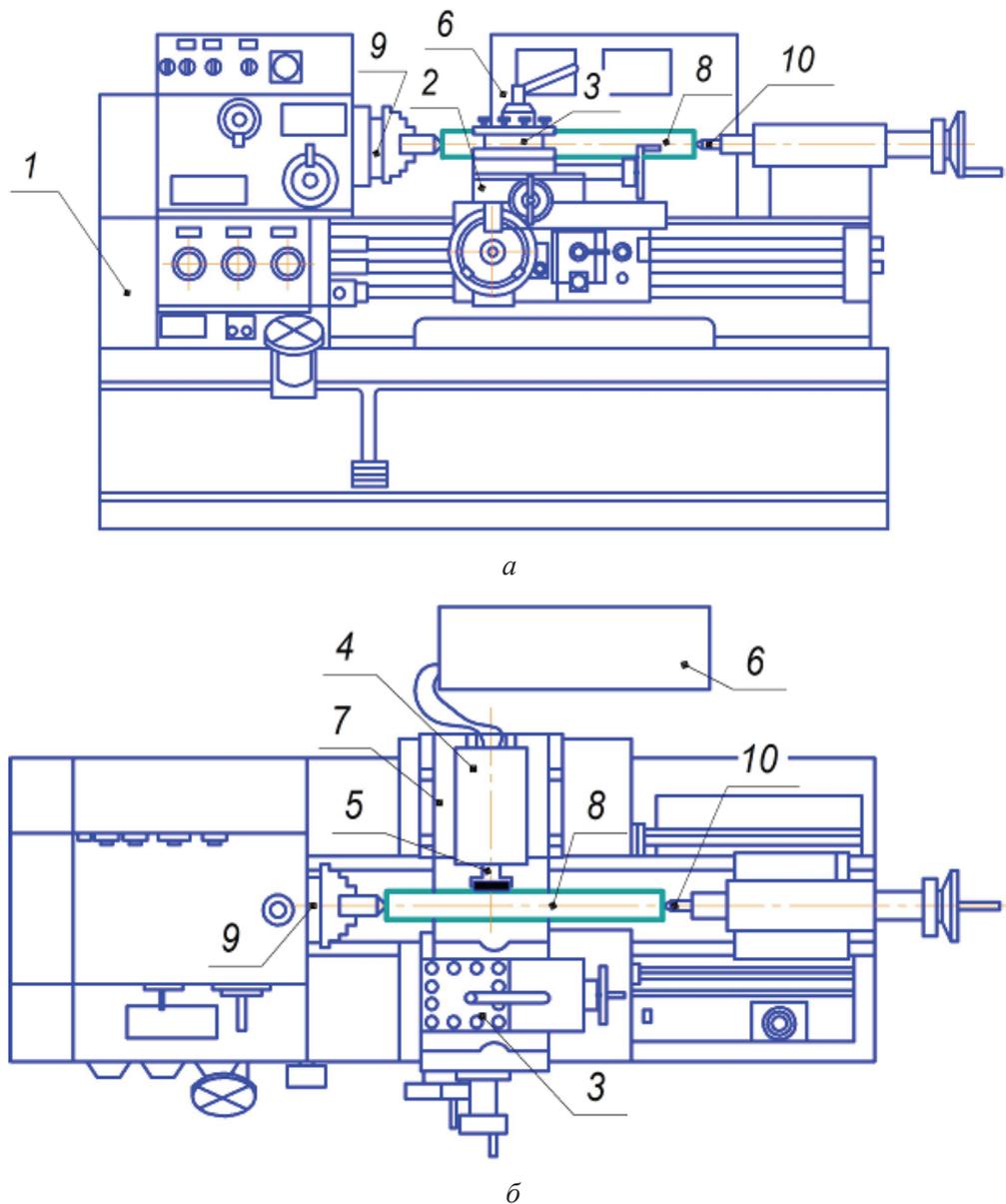


Рис. 14. Гибридный станок для интегральной обработки деталей в виде тел вращения:

*a* – вид спереди; *б* – вид сверху

Fig. 14. Hybrid machine for integrated processing of rotation bodies workpieces:

*a* – front view; *б* – top view

### Пример работы станка

Интегральную обработку изделий в виде тел вращения на гибридном станке для комбинированной обработки деталей осуществляют следующим образом. В центрах 10 станка 1 устанавливают деталь 8 в виде вала. Включают питание станка 1 и питание высокочастотного генератора 6. На первом переходе – предварительная электромеханическая обработка – одновременно происходит предварительный подогрев токами высокой частоты (далее ТВЧ)

от индуктора 5 детали 8 и процесс чернового точения. Для этого оператор гибридного станка выставляет в требуемое положение резцедержатель 3 в позицию с резцом для черновых операций, а находящийся в диаметрально противоположном направлении сменный петлевой индуктор 5 с магнитопроводом закалочного блока 4 посредством крестового стола 7 позиционируется в рабочее положение на величину технологического зазора (1...2 мм) относительно подогреваемой детали 8.

После завершения первого перехода оператор гибридного станка выключает высокочастотный генератор 6 и переводит станок 1 на режим второго перехода – полустачное точение, резцедержатель 3 устанавливается в позицию с соответствующим режущим инструментом, и процесс резания происходит без предварительного подогрева в окончательный размер, заданный рабочим чертежом на изготовление детали 8.

На третьем переходе – поверхностная закалка ТВЧ – оператор гибридного станка выставляет сменный индуктор 5 закалочного блока 4 в рабочее положение на величину постоянного технологического зазора порядка 0,1 мм относительно закаливаемой детали 8, что соответствует реализации более эффективной обработки – высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты. Оператор гибридного станка включает требуемый режим работы генератора 6. В процессе поверхностной закалки ТВЧ с подачей охлаждающей жидкости в зависимости от требуемой глубины упрочнения оператор корректирует работу генератора 6 во времени (мощность на сменном индукторе 5), приводов главного движения (обороты шпинделя 9) и приводов движений подачи станка 1. После завершения закалки оператор гибридного станка выключает высокочастотный генератор 6 и крестовый стол 7 перемещает сменный индуктор 5 в исходное (безопасное) положение. Для осуществления заключительного перехода – чистовое точение и алмазное выглаживание – резцедержатель 3 поворачивается в позицию, которой соответствует резец для чистовых операций, и осуществляется съём припуска закаленного металла, возникшего за счет объемного расширения упрочненного слоя (не более 0,02 мм). Для завершения полного технологического цикла изготовления детали 8 с целью обеспечения требуемой шероховатости поверхности, величины и характера распределения микротвердости и остаточных напряжений оператор переводит резцедержатель 3 в позицию с алмазным выглаживателем и осуществляет финишную механическую обработку. По завершении всего цикла обработки оператор выводит исполнительные органы в исходное положение, выключает высокочастотный генератор 6 и станок 1.

Использование предлагаемого гибридного станка существенно повысит производи-

тельность обработки в целом за счет реализации процессов поверхностной закалки методом высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты и механической обработки от одной технологической базы без промежуточных переустановов детали и инструментов.

## Заключение

Предложена и реализована оригинальная методика проведения структурно-кинематического анализа для предпроектных исследований гибридного металлообрабатывающего оборудования. В общем виде представлена теория обоснования выбора технических характеристик металлообрабатывающего оборудования, основанная на построении математической модели, учитывающей условия его эксплуатации. В основу предлагаемого подхода заложены элементы математической статистики и теории вероятности, что дает возможность применения систем автоматизированного проектирования на начальном этапе создания общей концепции нового технологического оборудования.

Теоретическими исследованиями было установлено, что эффективность проектирования гибридных металлообрабатывающих систем может быть повышена в 6,092...18,297 раз применением методологии предпроектных исследований. Произведена апробация разработанной методики проектирования и предложена схема реализации гибридного металлообрабатывающего технологического оборудования. Использование предлагаемого гибридного станка обеспечит повышение эффективности металлообработки в целом: существенно повысится производительность изготовления деталей машин за счет реализации процессов поверхностной закалки методом высокоэнергетического нагрева токами высокой частоты и механической обработки от одной технологической базы без промежуточных переустановов детали и инструментов.

## Список литературы

1. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multi-arms machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 1993. – Vol. 42, iss. 1. – P. 433–436. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62479-2.
2. Макаров В.М. Комплексированные технологические системы: перспективы и проблемы внедре-



ния // Ритм: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2011. – № 6 (64). – С. 20–23.

3. Brecher C., Özdemir D. Integrative production technology: theory and applications. – [S. l.]: Springer International Publ., 2017. – 1100 p. – ISBN 978-3-319-47451-9. – DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.

4. Manufacturing systems and technologies for the new frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, May 26–28, 2008, Tokyo, Japan / M. Mitsuishi, K. Ueda, F. Kimura, eds. – London: Springer, 2008. – 556 p. – eBook ISBN 978-1-84800-267-8. – DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.

5. Integration of production steps on a single equipment / V. Skeebea, V. Pushnin, I. Erohin, D. Kornev // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 30, iss. 12. – DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.

6. Hybrid processes in manufacturing / B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A.E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. Mcintosh // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 63, iss. 2. – P. 561–583. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.

7. Moriwaki T. Multi-functional machine tool // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 57, iss. 2. – P. 736–749. – DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.

8. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 42. – P. 81–86. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.

9. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 91. – P. 012051. – DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.

10. Research of influence electric conditions combined electrodiamond processing by on specific consumption of wheel\* / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeebea // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – P. 012081. – DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.

11. Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P. The concept of hybrid manufacturing for high performance parts // *South African Journal of Industrial Engineering*. – 2012. – Vol. 23, iss. 2. – P. 106–115.

12. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish [Electronic resource] / K.R. Berenji, U. Karagüzel, E. Özlü, E. Budak // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2019. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.067> (accessed: 14.05.2019).

13. Efficiency of hybrid equipment combining operations of surface hardening by high frequency currents and abrasive grinding / V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, N.V. Vakhrushev, K.A. Parts, G.O. Cha // *IOP Confer-*

*ence Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – Vol. 194, iss. 2. – P. 022038. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022038.

14. Salonitis K., Chondros T., Chryssolouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2008. – Vol. 38, iss. 1–2. – P. 48–58. – DOI: 10.1007/s00170-007-1078-9.

15. Иванцivский В.В., Скиба В.Ю. Совмещение операций поверхностной закалки и финишного шлифования на одном технологическом оборудовании // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2006. – № 1 (30). – С. 16–18.

16. Скиба В.Ю., Иванцivский В.В. Гибридное металлообрабатывающее оборудование: повышение эффективности технологического процесса обработки деталей при интеграции поверхностной закалки и абразивного шлифования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 312 с. – ISBN 978-5-7782-3690-5.

17. Ding H.T., Shin Y.C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2010. – Vol. 50, iss. 1. – P. 106–114. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001.

18. Densification, surface morphology, microstructure and mechanical properties of 316L fabricated by hybrid manufacturing / Y. Yang, Y. Gong, S. Qu, Y. Rong, Y. Sun, M. Cai // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 97, iss. 5–8. – P. 2687–2696. – DOI: 10.1007/s00170-018-2144-1.

19. Jeon Y., Lee C.M. Current research trend on laser assisted machining // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2012. – Vol. 13, iss. 2. – P. 311–317. – DOI: 10.1007/s12541-012-0040-4.

20. Ивахненко А.Г. Повышение эффективности ранних стадий проектирования металлорежущих станков на основе структурного синтеза формообразующих систем: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1998. – 244 с.

21. Effectiveness of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems / A.G. Ivakhnenko, V.V. Kuts, O.Y. Erenkov, E.O. Ivakhnenko, A.V. Oleinik // *Russian Engineering Research*. – 2017. – Vol. 37, no. 10. – P. 901–905. – DOI: 10.3103/S1068798X17100112.

22. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools–I – Analysis of requirements and specifications / M. Nakaminami, T. Tokuma, M. Moriwaki, K. Nakamoto // *International Journal of Automation Technology*. – 2007. – Vol. 1, no. 2. – P. 78–86. – DOI: 10.20965/ijat.2007.p0078.

23. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools–II – Investigation of basic structure / M. Nakaminami, T. Tokuma, K. Matsumoto, S. Sakashita, M. Moriwaki, K. Nakamoto // *Internation-*

al Journal of Automation Technology. – 2007. – Vol. 1, no. 2. – P. 87–93. – DOI: 10.20965/ijat.2007.p0087.

24. Introduction to precision machine design and error assessment / ed. by S. Mekid. – Boca Raton: CRC Press, 2008. – 302 p. – ISBN-10: 0849378869. – ISBN-13: 978-0849378867. – (Mechanical and Aerospace Engineering Series).

25. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических систем: монография. – Курск: Курский гос. техн. ун-т, 2010. – 151 с.

26. Куц В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Юго-Западный государственный университет. – Курск, 2012. – 365 с.

27. Повышение эффективности проектирования гибридного металлообрабатывающего оборудования, объединяющего механическую и поверхностно-термическую операции: отчет о научно-исследовательской работе по проекту № 9.11829.2018/11.12 / В.Ю. Скиба, В.В. Иванцовский, О.В. Нос, Е.А. Зверев, Т.Г. Мартынова, Н.В. Вахрушев, Ю.В. Ванаг, К.А. Титова, Г.О. Ча, П.Ю. Скиба. – № ГР АААА-А18-118062290029-8. – Новосибирск, 2018. – 197 с.

28. Bamberg E. Principles of rapid machine design: doctor of philosophy diss. / Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering. – Cambridge, 2000. – 212 p.

29. Luo X., Qin Y. Hybrid machining: theory, methods, and case studies. – London: Academic Press, 2018. – 326 p. – ISBN 9780128130599. – eISBN 9780128131138. – DOI: 10.1016/C2016-0-04527-8.

30. Shinno H., Hashizume H. Structured method for identifying success factors in new product development of machine tools // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2002. – Vol. 51, iss. 1. – P. 281–284. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61517-0.

31. Moriwaki T., Nunobiki M. Object-oriented design support system for machine tools // Journal of Intelligent Manufacturing. – 1994. – Vol. 5, iss. 1. – P. 47–54. – DOI: 10.1007/BF00124686.

32. Brecher C., Spachholz G., Paepenmüller F. Developments for high performance machine tool spindles // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2007. – Vol. 56, iss. 1. – P. 395–399. – DOI: 10.1016/j.cirp.2007.05.092.

33. Method for the optimization of kinematic and dynamic properties of parallel kinematic machines / R. Neugebauer, W.G. Drossel, C. Harbecker, S. Ihlenfeldt, S. Hensel // CIRP Annals – Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 55, iss. 1. – P. 403–406. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60445-4.

34. Kapur K.C., Lamberson L.R. Reliability in engineering design. – New Delhi: Wiley, India, 2009. – 608 p. – ISBN 9788126522453.

35. Федотенок А.А. Кинематическая структура металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1970. – 408 с.

36. Птицын С.В., Левицкий Л.В. Структурный анализ и синтез кинематики металлорежущих станков. – Киев: УМКВО, 1989. – 70 с.

37. Казанцев М.Е. Построение структурных схем станков и настройки исполнительных движений. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1997. – 54 с.

38. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков (Основы компонетики). – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.

39. Ивахненко А.Г. Концептуальное проектирование металлорежущих систем. Структурный синтез. – Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 1998. – 124 с.

40. Надежность прогноза качества технологического оборудования / С.В. Птицын, В.Ю. Скиба, Ю.С. Чёсов, Е.В. Мережко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2013. – № 2 (59). – С. 33–38.

41. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194, iss. 2. – P. 022037. – DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.

42. Чёсов Ю.С., Птицын С.В. Проектирование металлорежущего оборудования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 105 с.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Hybrid Process Equipment: Improving the Efficiency of the Integrated Metalworking Machines Initial Designing

Vadim Skeebea<sup>a, \*</sup>

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>,  [skeebea\\_vadim@mail.ru](mailto:skeebea_vadim@mail.ru)

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 15 November 2018

Revised: 17 January 2019

Accepted: 05 April 2019

Available online: 15 June 2019

#### Keywords:

Hybrid equipment

Conceptual design

Machining

Cutting

Surface hardening

#### Funding

The results were obtained under the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project code: 9.11829.2018/11.12.

### ABSTRACT

**Introduction.** Creating of a new process equipment begins with the development of a draft proposal, i.e. the general concept of the design object. A recent analysis emphasized that it is this stage (including exploratory design, specifications development and draft proposal) that accounts for up to 80% of the process equipment manufacturing and operating cost. With the task being complex itself, the mistakes made at the early design stages lead to a sharp increase in labor costs for their correction. Developing the concept of a future hybrid process equipment is a difficult task to formalize. Since multitask machine complex combine various methods of product processing during geometry generation and changing the surface properties, there is a high probability of compatibility problems of the integrated subsystems and components. This is due to the systems design and layout complexity, harmonization of the multitask machine operating characteristics, compatibility of the machine control principles for solving spatial trajectory tasks and ensuring the accuracy of geometry generation. *The purpose of the study* is to increase the effectiveness of the initial stages of the hybrid metalworking complexes designing based on the structural synthesis of the machine geometry generation systems and the prediction of their technical characteristics. **Methods:** Theoretical studies were based on the principles of system analysis, geometric theory of the surfaces formation, design of metal-working machines, as well as finite elements method, mathematical and computer simulation. **Results and discussion.** We present an original methodology for conducting structural kinematic analysis for exploratory design of hybrid metalworking equipment. Theoretical studies have established that the hybrid metalworking systems design efficiency can be increased 6.092... 18.297 times using the methodology of exploratory design. Since the developed design methodology was approved, we proposed the implementation scheme for the hybrid metalworking process equipment. The use of the proposed hybrid machine will increase the efficiency of metalworking in general: the machine parts manufacturing performance will significantly rise owing to the implementation of surface hardening processes by high-energy heating with high-frequency currents and mechanical processing on the same technological site without intermediate re-installation of the workpieces and tools.

**For citation:** Skeebea V.Yu. Hybrid process equipment: improving the efficiency of the integrated metalworking machines initial designing. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 62–83. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-62-83. (In Russian).

### References

1. Garro O., Martin P., Veron M. Shiva a multiarms machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 1993, vol. 42, iss. 1, pp. 433–436. DOI: 0.1016/S0007-8506(07)62479-2.
2. Makarov V.M. Kompleksirovannyye tekhnologicheskie sistemy: perspektivy i problemy vnedreniya [Well integrated technological systems: prospects and problems of implementation]. *Ritm: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiya = RITM: Repair. Innovation. Technologies. Modernization*, 2011, no. 6 (64), pp. 20–23.
3. Brecher C., Özdemir D. Integrative production technology: theory and applications. Springer International Publ., 2017. 1100 p. ISBN 978-3-319-47451-9. DOI: 10.1007/978-3-319-47452-6.

#### \* Corresponding author

Skeebea Vadim Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor  
 Novosibirsk State Technical University,  
 20 Prospekt K. Marksa,  
 Novosibirsk, 630073, Russian Federation  
 Tel: 8 (383) 346-17-79, e-mail: [skeebea\\_vadim@mail.ru](mailto:skeebea_vadim@mail.ru)

4. Mitsuishi M., Ueda K., Kimura F., eds. *Manufacturing systems and technologies for the new frontier: the 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, May 26–28, 2008, Tokyo, Japan. London, Springer, 2008. 556 p. eBook ISBN 978-1-84800-267-8. DOI: 10.1007/978-1-84800-267-8.
5. Skeebe V., Pushnin V., Erohin I., Kornev D. Integration of production steps on a single equipment. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, vol. 30, iss. 12. DOI: 10.1080/10426914.2014.973595.
6. Lauwers B., Klocke F., Klink A., Tekkaya A.E., Neugebauer R., Mcintosh D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63, iss. 2, pp. 561–583. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.003.
7. Moriwaki T. Multi-functional machine tool. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2008, vol. 57, iss. 2, pp. 736–749. DOI: 10.1016/j.cirp.2008.09.004.
8. Yamazaki T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with CNC machining. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 81–86. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.193.
9. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arkhipov P.V. Research of influence of electric conditions of the combined electro-diamond machining on quality of grinding of hard alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, p. 012051. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012051.
10. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. Research of influence electric conditions combined electrodiamond processing by on specific consumption of wheel\*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 142, p. 012081. DOI: 10.1088/1757-899X/142/1/012081.
11. Boivie K., Karlsen R., Ystgaard P. The concept of hybrid manufacturing for high performance parts. *South African Journal of Industrial Engineering*, 2012, vol. 23, iss. 2, pp. 106–115.
12. Berenji K.R., Karagüzel U., Özlü E., Budak E. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.067> (accessed 14.05.2019).
13. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Vakhrushev N.V., Parts K.A., Cha G.O. Efficiency of hybrid equipment combining operations of surface hardening by high frequency currents and abrasive grinding. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194, iss. 2, p. 022038. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022038.
14. Salonitis K., Chondros T., Chryssolouris G. Grinding wheel effect in the grind-hardening process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, vol. 38, iss. 1–2, pp. 48–58. DOI: 10.1007/s00170-007-1078-9.
15. Ivantsivsky V.V., Skeebe V.Yu. Sovmeshchenie operatsii poverkhnostnoi zakalki i finishnogo shlifovaniya na odnom tekhnologicheskome oborudovanii [Combining the operations of surface hardening and finish grinding on the same processing equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2006, no. 1 (30), pp. 16–18.
16. Skeebe V.Yu., Ivantsivsky V.V. *Gibridnoe metallobrabatyvayushchee oborudovanie: povyshenie effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa obrabotki detalei pri integratsii poverkhnostnoi zakalki i abrazivnogo shlifovaniya* [Hybrid metal working equipment: improving the effectiveness of the details processing under the integration of surface quenching and abrasive grinding]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018. 312 p. ISBN 978-5-7782-3690-5.
17. Ding H.T., Shin Y.C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 1, pp. 106–114. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.09.001.
18. Yang Y., Gong Y., Qu S., Rong Y., Sun Y., Cai M. Densification, surface morphology, microstructure and mechanical properties of 316L fabricated by hybrid manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 97, iss. 5–8, pp. 2687–2696. DOI: 10.1007/s00170-018-2144-1.
19. Jeon Y., Lee C.M. Current research trend on laser assisted machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, vol. 13, iss. 2, pp. 311–317. DOI: 10.1007/s12541-012-0040-4.
20. Ivakhnenko A.G. *Povyshenie effektivnosti rannikh stadii proektirovaniya metallovezhushchikh stankov na osnove strukturnogo sinteza formoobrazuyushchikh sistem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Improving the efficiency of the early stages of designing machine tools based on the structural synthesis of shaping systems. Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 1998. 244 p.
21. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V., Erenkov O.Y., Ivakhnenko E.O., Oleinik A.V. Effectiveness of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems. *Russian Engineering Research*, 2017, vol. 37, no. 10, pp. 901–905. DOI: 10.3103/S1068798X17100112.
22. Nakaminami M., Tokuma T., Moriwaki M., Nakamoto K. Optimal structure design methodology for compound multi-axis machine tools—I – Analysis of requirements and specifications. *International Journal of Automation Technology*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 78–86. DOI: 10.20965/ijat.2007.p0078.

23. Nakaminami M., Tokuma T., Matsumoto K., Sakashita S., Moriwaki T., Nakamoto K. Optimal structure design methodology for compound multiaxis machine tools–II – Investigation of basic structure. *International Journal of Automation Technology*, 2007, vol. 1, no. 2, pp. 87–93. DOI: 10.20965/ijat.2007.p0087.
24. Mekid S., ed. *Introduction to precision machine design and error assessment. Mechanical and Aerospace Engineering Series*. Boca Raton, CRC Press, 2008. 302 p. ISBN-10: 0849378869. ISBN-13: 978-0849378867.
25. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V. *Strukturno-parametricheskii sintez tekhnologicheskikh sistem* [Structural-parametric synthesis of technological systems]. Kursk, KurskSTU Publ., 2010. 151 p.
26. Kuts V.V. *Metodologiya predproektnykh issledovaniy spetsializirovannykh metallobrabatyvayushchikh sistem*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methodology of pre-design studies of specialized metal-cutting systems. Dr. eng. sci. diss.]. Kursk, 2012. 365 p.
27. Skeebe V.Yu., Ivantsivsky V.V., Nos O.V., Zverev E.A., Martynova T.G., Vakhrushev N.V., Vanag Yu.V., Titova K.A., Cha G.O., Skiba P.Yu. *Povyshenie effektivnosti proektirovaniya gibridnogo metallobrabatyvayushchego oborudovaniya, ob'edinyayushchego mekhanicheskuyu i poverkhnostno-termicheskuyu operatsii: otchet N 9.11829.2018/11.12* [Improving the efficiency of the conceptual design of the integrated metal-cutting equipment, combining mechanical and surface thermal operation: report N 9.11829.2018/11.12]. No. AAAA-A18-118062290029-8, 2018. 197 p.
28. Bamberg E. *Principles of rapid machine design: doctor of philosophy diss.* Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering. Cambridge, 2000. 212 p.
29. Luo X., Qin Y. *Hybrid machining: theory, methods, and case studies*. London, Academic Press, 2018. 326 p. ISBN 9780128130599. eISBN 9780128131138. DOI: 10.1016/C2016-0-04527-8.
30. Shinno H., Hashizume H. Structured method for identifying success factors in new product development of machine tools. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2002, vol. 51, iss. 1, pp. 281–284. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61517-0.
31. Moriwaki T., Nunobiki M. Object-oriented design support system for machine tools. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 1994, vol. 5, iss. 1, pp. 47–54. DOI: 10.1007/BF00124686.
32. Brecher C., Spachtholz G., Paepenmüller F. Developments for high performance machine tool spindles. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2007, vol. 56, iss. 1, pp. 395–399. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.05.092.
33. Neugebauer R., Drossel W.G., Harbecker C., Ihlenfeldt S., Hensel S. Method for the optimization of kinematic and dynamic properties of parallel kinematic machines. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2006, vol. 55, iss. 1, pp. 403–406. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60445-4.
34. Kapur K.C., Lamberson L.R. *Reliability in engineering design*. New Delhi, Wiley, India, 2009. 608 p. ISBN 9788126522453.
35. Fedotenok A.A. *Kinematicheskaya struktura metallobrabatyvayushchikh stankov* [Kinematic structure of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 408 p.
36. Ptitsyn S.V., Levitskii L.V. *Strukturnyi analiz i sintez kinematiki metallobrabatyvayushchikh stankov* [Structural analysis and kinematics synthesis of machine tools]. Kiev, UMKVO Publ., 1989. 70 p.
37. Kazantsev M.E. *Postroyeniye strukturnykh skhem stankov i nastroyki ispolnitel'nykh dvizhenii* [Construction of block diagrams of machine tools and adjustment of executive movements]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1997. 54 p.
38. Vragov Yu.D. *Analiz komponovok metallobrabatyvayushchikh stankov (Osnovy komponentiki)* [Analysis of the layout of machine tools. The basics of compositing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 208 p.
39. Ivakhnenko A.G. *Kontseptual'noye proektirovaniye metallobrabatyvayushchikh sistem. Strukturnyi sintez* [Conceptual design of metal-cutting systems. Structural synthesis]. Khabarovsk, KhGTU Publ., 1998. 124 p.
40. Ptitsyn S.V., Skeebe V.Yu., Chesov Yu.S., Merezhko E.V. *Nadezhnost' prognoza kachestva tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Reliability prediction of quality process equipment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovaniye, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2013, no. 2 (59), pp. 33–38.
41. Skeebe V.Yu., Ivantsivsky V.V. Reliability of quality forecast for hybrid metal-working machinery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 194, iss. 2, p. 022037. DOI: 10.1088/1755-1315/194/2/022037.
42. Chesov Yu.S., Ptitsyn S.V. *Proektirovaniye metallobrabatyvayushchego oborudovaniya* [Design of metal-cutting equipment]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2005. 105 p.

## Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.