

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 8 (146). С. 12-19.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 8 (146). P. 12-19.

Научная статья
УДК 621.7/620.3
doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-19

Проектирование мехатронных систем гибридных станочных комплексов

Михаил Львович Хейфец, д.т.н.
Институт прикладной физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь
mlk-z@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6942-3605>

Аннотация. Рассмотрены мировые тенденции за последние полвека и перспективы развития на ближайшие десятилетия комплексов технологического оборудования. Проведен всесторонний анализ применяемых стадий и этапов проектирования обрабатывающего оборудования с помощью построения традиционных для механики машин расчетных схем. Показано, что перспективы применения потоков энергии для интенсификации процессов обработки, должны анализироваться на ранних стадиях проектирования, с использованием теплофизических и электрофизических критериев для изучения формирующихся связей в системе. Предложено приступать к проектированию мехатронных систем станочных комплексов, с анализа структурных связей информационных технологий в гибридном производстве, включающем традиционные и аддитивные технологии. Рекомендовано использовать последовательности критериев переноса для анализа процессов образования структур материала и поверхностного слоя при термомеханической и электрофизической обработке. Критерии тепломассопереноса устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале при увеличении мощности воздействий. Критерии, характеризующие потоки энергии, при электрофизической обработке оказывают влияние на последовательность поверхностных явлений и определяют процесс формирования свойств материала. Показана организация обратных связей при управлении технологическим оборудованием через степени свободы инструментов, частиц наносимого материала и удаляемого слоя, посредством дополнительных воздействий потоками энергии. С учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе, следует выбирать системы числового программного управления и проектировать комплекс станочного оборудования как мехатронную систему. Комплекс гибридного технологического оборудования с позиций компьютеризации производственной деятельности, а также его модули, следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

Ключевые слова: мехатронные системы, гибридные станочные комплексы, теплофизические и электрофизические критерии, традиционные и аддитивные технологии

Для цитирования: Хейфец М.Л. Проектирование мехатронных систем гибридных станочных комплексов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 8 (146). С. 12–19. doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-19

Design of mechatronic systems of hybrid machine complexes

Mikhail L. Kheifets, D. Eng.
Institute of Applied Physics NAS of Belarus, Minsk, Belarus
mlk-z@mail.ru

Abstract. The world trends over the last half century and prospects for the development of technological equipment complexes for the coming decades are viewed. A comprehensive analysis of the applied stages and stages of designing processing machinery with the help of the construction of traditional mechanical design models is carried out. It is shown that the prospects of using energy flows to intensify machining processes should be analyzed at the early stages of design, using thermal and electrophysical criteria to study the emerging connections in the system. It is proposed to start designing mechatronic systems of machine complexes by analyzing structural connections of information technologies in hybrid production, including traditional and additive technologies. It is recommended to use sequences of transfer criteria to analyze the processes of formation of material structures and the surface layer under thermomechanical and electrophysical processing. The criteria of heat and mass transfer sequence the structure formation in the finished material with an increase in the power of stimulation. The criteria characterizing energy flows within electrophysical processing influence the sequence of surface phenomena and determine the process of material properties formation. Feedbacks linkage in the control of production machinery is shown through the degrees of tool

freedom, particles of the applied material and the layer to be removed, by means of additional effects of energy flows. Taking into account direct and feedback loops in the technological system, numerical control systems should be selected and the machining facility complex should be designed as a mechatronic system. The complex of hybrid technological equipment from the standpoint of computerization of production activities, as well as its modules, should be designed as computer peripherals devices based on the same architecture like a computer.

Keywords: mechatronic systems, hybrid machine tool complexes, thermophysical and electrophysical criteria, traditional and additive technologies

For citation: Kheifets M.L. Design of mechatronic systems of hybrid machine complexes / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 8 (146). P. 12–19. doi: 10.30987/2223-4608-2023-12-19

Введение

Совокупность средств производства или производящих машин, включающих: технологические, транспортные, энергетические и информационные машины, получила название технологических комплексов. Такие комплексы автономно функционируют и с использованием программного управления, в установленных пределах значений, обеспечивают требуемые характеристики качества изделий [1 – 3].

Комплексы технологического оборудования прошли в своем развитии ряд этапов. По сравнению с универсальным станочным оборудованием современное компьютерно-управляемое производство, использующее компоненты искусственного интеллекта, позволяет повысить эффективность оборудования в десятки раз при обеспечении все более возрастающих требований к качеству продукции [4 – 6].

Мировые тенденции развития технологических комплексов

Началом первого этапа развития технологических комплексов (рис. 1) можно обозначить автоматизацию 1970-х гг. на основе числового программного управления (ЧПУ). В постиндустриальных странах уже с середины 1980-х гг. наметился переход от обрабатывающих центров к гибким производственным системам с элементами интеллектуального производства [7].

Развитие средств микроэлектроники явилось базой для создания мехатронных систем, которые включают как электромеханическую, так и электронно-управляющую части. Мехатронные системы обеспечивают энергетическое объединение узлов точной

механики с электротехническими, электронными и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциями [8, 9].

Новые этапы развития гибкой автоматизации производственных систем связаны, прежде всего, с предельной концентрацией средств производства и управления, а также с сокращением сроков конструирования, проектирования, технологической подготовки и изготовления изделий. В результате мехатронные технологические комплексы объединяются в гибридное компактное интеллектуальное производство (CIM – Compact Intelligent Manufacture), базирующееся на сочетании различных интенсивных, в том числе и аддитивных технологий, прогрессивного технологического оборудования и интегрированной системы управления [10].

Современный уровень развития информационных технологий в промышленности обеспечил переход к использованию технологий создания, поддержки и применения единого информационного пространства во времени на всех этапах жизненного цикла продукции: от ее проектирования до эксплуатации и утилизации, то есть к CALS-технологиям (Continuous Acquisition and Life-cycle Support). Единое информационное пространство позволяет интегрироваться разрозненным комплексам компактного производства в виртуальное предприятие, создаваемое из различных пространственно удаленных подразделений, которые обладают единой информационной ERP-системой (Enterprise Resource Planning) для использования в компьютерной поддержке этапов жизненного цикла продукции [11].

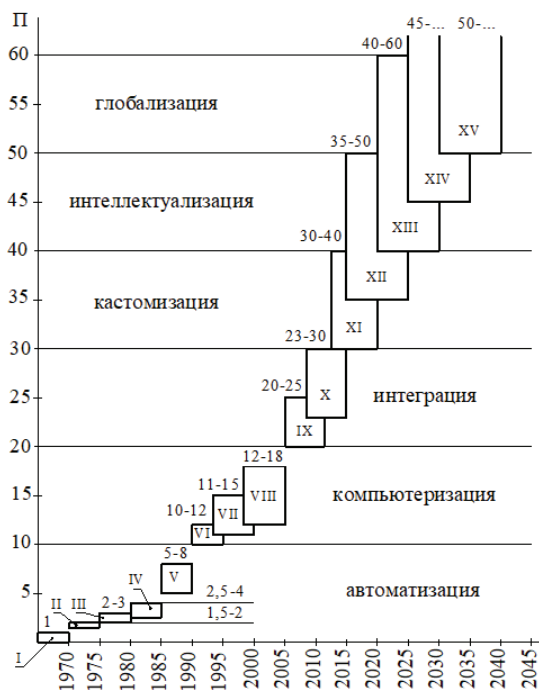


Рис. 1. Этапы развития комплексов технологического оборудования:

П – производительность оборудования, возрастающая со временем: I – универсальное оборудование с производительностью, принятой за 1,0; II – оборудование с числовым программным управлением; III – робототехнические комплексы; IV – обрабатывающие центры; V – гибкие производственные системы; VI – компьютерно-управляемое производство; VII – мехатронные технологические комплексы; VIII – компактное интеллектуальное производство; IX – компьютерное сопровождение жизненного цикла изделий; X – виртуальные предприятия; XI – аддитивное производство; XII – интернет вещей; XIII – машинное обучение; XIV – искусственный интеллект; XV – синергия технологий

Fig. 1. Stages of development of production machinery complexes:

P – equipment productivity, increasing in due course time: I – universal equipment with a performance taken as 1,0; II – equipment with numerical control; III – robotic complexes; IV – processing centers; V – flexible production systems; VI – computer-controlled production; VII – mechatronic technological complexes; VIII – compact intelligent production; IX – computer support of the life cycle of products; X – virtual enterprises; XI – additive production; XII – Internet of things; XIII – machine learning; XIV – artificial intelligence; XV – synergy of technologies

После пространственно-временной интеграции производственных процессов и жизненного цикла изделий следуют этапы, обеспечивающие компактность производства на основе технологий аддитивного производства (AM – Additive Manufacturing). Аддитивные

технологии синтеза композиционного материала и формообразования изделия обеспечивают высокую эффективность за счет сокращения длительности и количества производственно-технологических этапов жизненного цикла изделий [12].

Анализ производства и адресной поставки кастомизированных изделий, с учетом внешней и внутренней логистики предприятий, можно дополнить прогнозом на ближайшее будущее, которое обусловлено новой парадигмой производства, связанной с промышленным интернетом вещей (IIoT – Industrial Internet of Things) и называемой «Индустрия 4.0».

В основе зарождающихся этапов новой эпохи лежит массовая компьютеризация и глобализация интернета. Дальнейшее развитие производства прогнозируют на базе машинного обучения (ML – Machine Learning) и искусственного интеллекта (AI – Artificial Intelligence). Сочетание робототехники и 3D-печати на основе машинного обучения с интернетом вещей в глобальной сети и искусственным интеллектом уже сегодня позволяют создавать полностью автоматизированные производства [5, 6].

Одновременно с эволюцией производственных технологий идет прогресс биомедицинских технологий, с которыми связывают «Индустрию 5.0». По прогнозам уже после 2025 г. носимая человеком электроника начнет замещаться имплантатами, а в 2030-х гг. 3D-принтеры приступят к печати новых органов, и к 2040-м гг. нанороботы начнут ремонтировать организм на клеточном уровне. Предполагают, что к 2035 г. люди могут стать «киборгами», напичканными множеством электронных имплантов, а к 2045 г. вся планета превратится в один «огромный компьютер», использующий весь людской интеллект [5, 6].

Анализ традиционных стадий и этапов проектирования оборудования

Мехатронные станочные системы включают механическую (кинематическую), электромеханическую (энергетическую), электронную и управляющую (использующую компьютеры и микропроцессоры) части. В нее входят: датчики состояния как внешней среды, так и самой системы управления; источники энергии; исполнительные механизмы; усилители;

вычислительные элементы (компьютеры и микропроцессоры). Мехатронная система представляет собой единый комплекс электро-механических и электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется непрерывный обмен энергией и информацией [8, 9].

Функционально простую мехатронную систему комплекса технологического оборудования можно подразделить на следующие составные части [1, 5]: исполнительные устройства (объект управления и приводы), информационные устройства (датчики внутреннего состояния системы и датчики состояния внешней среды) и систему управления (компьютер и микропроцессоры). Взаимодействие между этими частями, реализующее прямые и обратные связи в системе, осуществляется через устройство сопряжения (интерфейс). Система управления включает аппаратные средства и программное обеспечение, которое управляет согласованной работой аппаратных средств и обеспечивает синхронизацию

процессов сбора и обработки данных, поступающих от информационных устройств, с процессами, управляющими исполнительными устройствами (рис. 2).

При проектировании механической части технологического оборудования, используемого в традиционном и в перспективном производстве, применяются как известные, так и новые схемы формообразования и послойного синтеза изделий, а также интенсивные процессы модифицирования материалов концентрированными и распределенными потоками энергии [5, 13].

Традиционно исходные данные для проектирования технологического оборудования содержит техническое задание конкретного заказчика, включающее только:

- данные о материалах и готовых изделиях;
- производительность оборудования;
- характер и тип производства;
- уровень автоматизации и встраиваемость в современное высокотехнологичное производство.

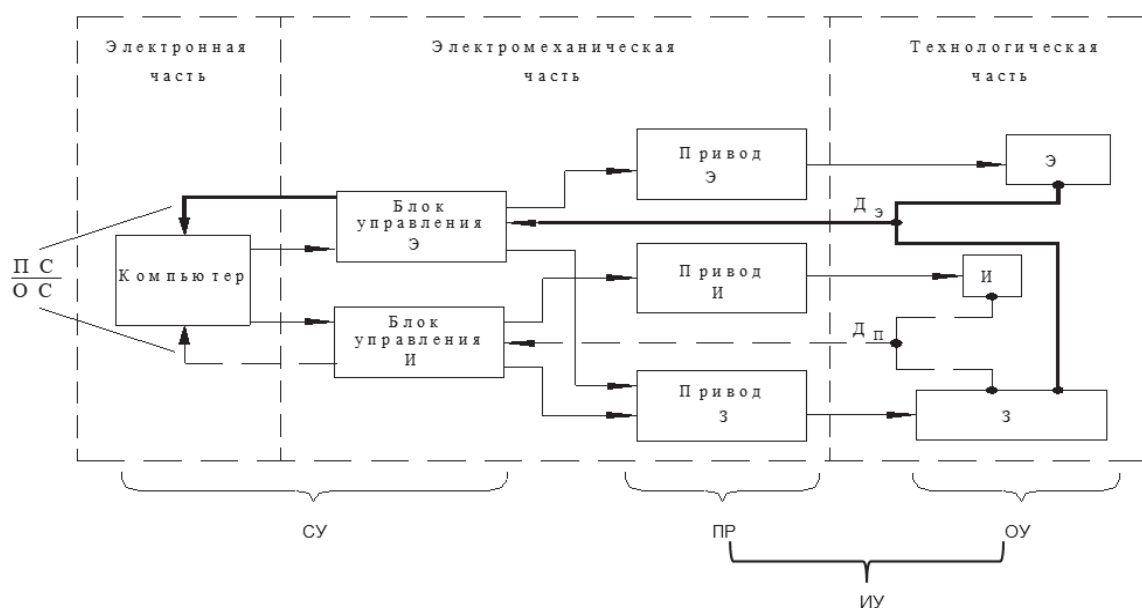


Рис. 2. Структурная схема мехатронного технологического оборудования:

З – заготовка; И – инструмент; Э – концентрированный поток энергии; Дп – датчик перемещений; Дэ – датчик интенсивности потока энергии; СУ – система управления; ПР – приводы; ОУ – объект управления; ИУ – исполнительные устройства; ПС – прямая связь; ОС – обратная связь

Fig. 2. Structural diagram of mechatronic technological equipment:

W – workpiece; T – tool; E – concentrated energy flow; Ds - displacement sensor; De – energy flow intensity sensor; CS – control system; Dr – drives; CO – control object; A – actuators; DC – direct communication; F – feedback

Последовательность проектирования технологического оборудования для производства

традиционного типа включает укрупненные стадии, опирающиеся на расчетные схемы:

- 1) компоновка и выбор кинематической схемы;
- 2) модульное построение по ограниченному набору агрегатов и узлов;
- 3) выбор схемы и проведение прочностных расчетов;
- 4) выбор схемы и проведение динамических расчетов;
- 5) выбор термодинамической схемы и расчет температур;
- 6) точностные расчеты геометрических и кинематических связей;
- 7) расчеты надежности и долговечности с экономическим обоснованием ресурса оборудования;
- 8) анализ человеко-машинной системы, включающий охрану труда.

Расчет основных систем технологического оборудования производится по детализированным стадиям для: несущих систем; направляющих движений; приводов движений и других.

Проектирование основных систем технологического оборудования проводится по техническим требованиям, предъявляемым: механическим агрегатам, технологической оснастке и средствам автоматизации; системам смазки и охлаждения; электрооборудованию и программируемым системам; системам диагностики, с учетом техники безопасности и эргономики станка.

В первую очередь при проектировании строятся схемы систем, с учетом ограничительных наборов агрегатов и узлов. Затем после структурного синтеза проводится параметрическая оптимизация, определяющая основные параметры систем технологического оборудования.

Применение потоков энергии для интенсификации процессов обработки

При формировании комплексов технологического оборудования для автоматизированного производства, использующего управление многочисленными приводами, концентрированными и распределенными потоками энергии, перечисленных стадий проектирования недостаточно. Связано это с тем, что требуется дополнительно рассматривать схемы технологических модулей и определять параметры оборудования, описывающие подвод

инструмента и распределение потоков энергии и материала (рис. 3).

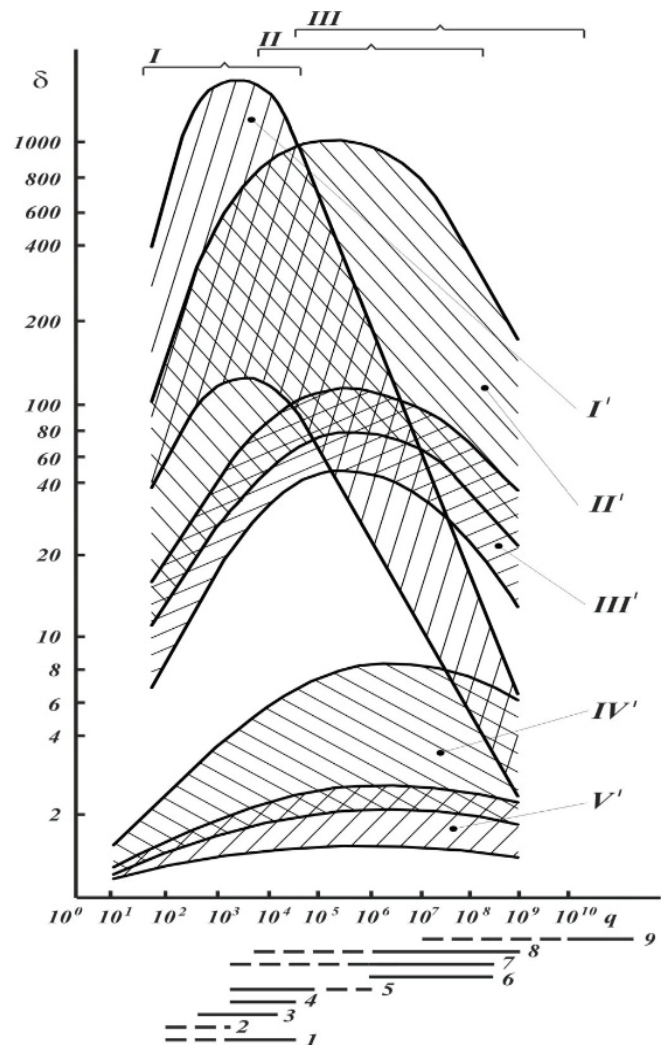


Рис. 3. Распределение методов обработки по точности формирования поверхностей (I' – разделение; II' – нанесение; III' – термообработка; IV' – резание; V' – деформирование) в зависимости от уровня концентрации энергии (I – объемная распределенная; II – множество локализованных; III – сфокусированные зоны тепловыделения) при использовании технологических источников:

1 – индукционный нагрев; 2 – газовое пламя; 3 – плазменная дуга; 4 – электроконтактный подогрев; 5 – сварочная дуга; 6 – искровой разряд; 7 – электронный, ионный луч; 8 – непрерывный лазер; 9 – импульсно-периодический лазер

Fig. 3. Distribution of processing methods according to the accuracy of surface formation (I' – separation; II' – application; III' – heat treatment; IV' – cutting; V' – deformation) depending on the level of energy concentration (I – volumetric distributed; II – the number of locate data; III – focused heat release zones) when using technological sources:

1 – induction heating; 2 – gas flame; 3 – plasma arc; 4 – electric contact heating; 5 – welding arc; 6 – spark discharge; 7 – electron, ion beam; 8 – continuous laser; 9 – pulse-periodic laser

Создание формы изделия в аддитивных технологиях происходит путем добавления материала, с использованием источников энергии, в отличие от традиционных технологий механической обработки, основанных на удалении инструментом «лишнего» материала.

Широко применяемые в мировом производстве технологии позволяют заключить, что наиболее перспективно применение оборудования по наращиванию слоев и формообразованию поверхностей изделий, использующего различные сочетания материалов и источников энергии. Это в свою очередь ставит задачи распределения компонентов материалов и потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру подачи материала и энергии [5, 13].

Использование последовательностей критериев переноса для анализа процессов образования структуры материала многократно сокращает объем экспериментальных исследований технологии по формированию поверхностного слоя при термомеханической и электрофизической обработке. Критерии тепломассопереноса устанавливают последовательность структурообразования в обрабатываемом материале при увеличении мощности воздействий. Критерии, характеризующие потоки энергии, при электрофизической обработке оказывают влияние на последовательность поверхностных явлений и определяют процесс формирования свойств материала [13].

Организация обратных связей при управлении технологическим оборудованием через степени свободы инструментов, частиц наносимого материала и удаляемого слоя, посредством дополнительных воздействий потоками энергии, позволяет управлять устойчивостью процессов формирования поверхностного слоя. Поэтому, с учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе, следует выбирать системы числового программного управления и проектировать комплекс технологического оборудования как мехатронную систему [1, 5].

Рассматривая комплекс технологического оборудования с позиций компьютеризации производственной деятельности, его модули, узлы и детали следует проектировать как устройства

компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

Структурные связи информационных технологий в аддитивном производстве

Анализ процессов производства деталей без использования формообразующей оснастки (3D-печати), в зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности технологических операций [1, 5], позволяет в виде диаграммы структурных связей описывать совокупность методов прямого «выращивания» изделий (рис. 4).

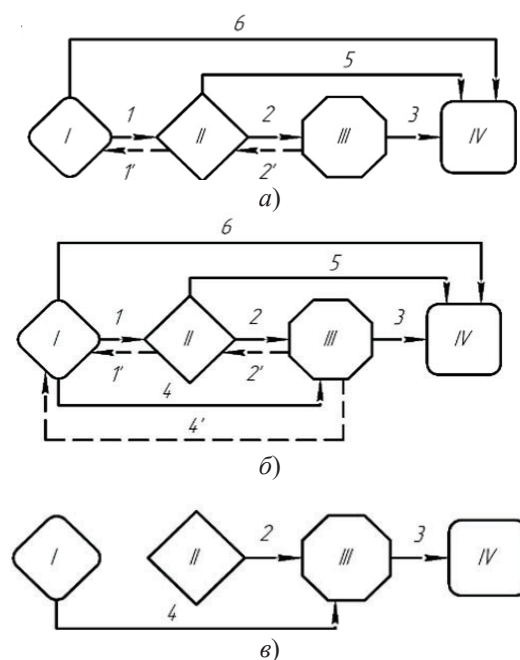


Рис. 4. Диаграммы структурных связей технологий в аддитивном производстве (I – прямое получение «выращиванием»; II – послойный «платформенный» синтез; III – оперативное макетирование «прототипирование»; IV – окончательное «3D формирование» изделий):

a – обобщенная модель методов производства изделий без формообразующей оснастки; б – сборка из листовых материалов в LOM-процессе; в – синтез лазерным сплавлением порошковых слоев в SLS-процессе

Fig. 4. Diagrams of structural connections of technologies in additive manufacturing (I - direct production by «growth»; II - layered «platform» synthesis; III - operational scale modelling «prototyping»; IV - final «3D formation» of products):

a – generalized model methods of products manufacturing without shape-generating molding tools; b – assembly of sheet materials in the LOM process; c – synthesis by laser fusion of porous layers in the SLS process

Диаграмма структурных связей представляет собой направленный замкнутый граф и описывает автомат с конечным числом состояний. Вершины графа изображают процессы создания изделий без формообразующей оснастки и представляют логические операции: трансляцию информации (II); движение потоков вещества и энергии (III); запуск (I) и остановку (IV) автоматического цикла [14, 15].

Описание алгоритмами в соответствии с терминами логических операций процессов 3D-печати по диаграмме структурных связей дает возможность анализировать существующие и разрабатывать новые методы прямого «выращивания» изделий [1, 5].

Заключение

Анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования, мировых тенденций за последние полвека и перспектив развития на ближайшие десятилетия гибридных мехатронных станочных комплексов показывает, что отечественное станкостроение в последние десятилетия не развивалось должными темпами. Ставка делалась на приобретение лучших зарубежных образцов оборудования ведущих фирм или станков и средств их оснащения недорогого массового производства.

В этой связи, научное сопровождение развития станкостроения при цифровизации производства, в настоящее время становится крайне необходимым и должно строиться на фундаментальной и поисковой основе, совместными усилиями академической, отраслевой и вузовской науки.

Всесторонний комплексный анализ проектирования обрабатывающего оборудования с помощью построения традиционных для механики машин расчетных схем показал, что перспективы применения новых технологий, использующих искусственный интеллект, потоки энергии для интенсификации процессов обработки и модифицирования материалов, должны анализироваться на ранних стадиях проектирования.

Предложено приступать к проектированию мехатронных систем станочных комплексов с анализа структурных связей информационных технологий в гибридном производстве, включающем как традиционные, так и

аддитивные технологии, и использовать теплофизические и электрофизические критерии для изучения формирующихся связей в технологической системе.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Теоретические** основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. Минск: Беларус. навука, 2012. 239 с.
2. **Конструирование** и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. Минск: Беларус. навука, 2014. 316 с.
3. **Автоматизация** и управление в технологических комплексах / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкий (гл. ред.), П.А. Витязь (зам. гл. ред.), М.Л. Хейфец (зам. гл. ред.). Минск: Беларус. навука, 2014. 375 с.
4. **Обеспечение** качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца. Минск: Беларус. навука, 2019. 248 с.
5. **Хейфец М. Л.** Проектирование мехатронных технологических комплексов для традиционного и аддитивного производства // Доклады Нац. акад. наук Беларуси. 2020. Т. 64. № 6. С. 744–751.
6. **Перспективные** технологии машиностроительного производства / О. П. Голубев [и др.]; под общ. ред. Ж. А. Мрочка и М. Л. Хейфеца. Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2007. 204 с.
7. **Сироткин О.** Технологический облик России на рубеже XXI века / О. Сироткин // Экономист. 1998. № 4. С. 3–9.
8. **Мехатроника** / Т. Исии [и др.]; пер. с яп. С.А. Масленникова; под. ред. В.В. Василькова. М.: Мир, 1988. 314 с.
9. **Bradley D.A.** Mechatronics – Electronics in Products and Processes. London: Chapman & Hall, 1993. 376 p.
10. **Delchambke A.** Computer-aided Assembly Planning. London: Chapman & Hall, 1992. 276 p.
11. **Компьютеризированные** интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении / Б.И. Черпаков [и др.]; под ред. Б.И. Черпакова. М.: ГУП «ВИМИ», 1999. 512 с.
12. **Gibson I.** Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stuker. N.Y.: Springer, 2015. 498 p.
13. **Хейфец М.Л., Крутько В.С., Грецкий Н.Л.** Проектирование технологических процессов и оборудования, использующих поля и потоки энергии на основе анализа критериев подобия // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2021. Т. 65, № 5. С. 628–635.
14. **Нейман фон Дж.** Теория самовоспроизводящих автоматов. М.: Мир, 1971. 342 с.
15. **Винер Н.** Кибернетика или управление и связь в живом и машине. М.: Совет. радио, 1958. 296 с.

REFERENCES

1. Theoretical foundations of the design of technological complexes / A.M. Rusetsky [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky. Minsk: Belarus. navuka, 2012. 239 p.
2. Design and equipment of technological complexes / A.M. Rusetsky [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky. Minsk: Belarus, navuka, 2014, 316 p.
3. Automation and control in technological complexes / A.M. Rusetsky [et al.]; under the general editorship of A.M. Rusetsky (chief editor), P. A. Vityaz (deputy editor-in-chief), M. L. Heifets (deputy see ed.). Minsk: Belarus. nauka, 2014, 375 p.
4. Product quality support in technological complexes / S.A. Chizhik [et al.]; under the general editorship of M.L. Heifets. Minsk: Belorussian Science, 2019, 248 p.
5. Kheifets M. L. Design of mechatronic technological complexes for traditional and additive manufacturing // Reports of the National Academy of Sciences of Belarus, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 744–751.
6. Promising technologies of machine-building production / O. P. Golubev [et al.]; under the general editorship of J. A. Mrochek and M. L. Heifetz. Novopolotsk: Polotsk State University, 2007. 204 p.
7. Sirotkin O. The technological appearance of Russia at the turn of the XXI century. / O. Sirotkin // Economist, 1998, no. 4, pp. 3–9.
8. Mechatronics / T. Ishii [et al.]; translated from the Japanese by S.A. Maslennikov; edited by V.V. Vasilkov. Moscow: Mir, 1988, 314 p.
9. Bradley D.A. Mechatronics – Electronics in Products and Processes. London: Chap-man & Hall, 1993. 376 p.
10. Delchambke A. Computer-aided Assembly Planning. London: Chap-man & Hall, 1992. 276 p.
11. Computerized integrated production and CALS technologies in mechanical engineering / B.I. Cherpakov [et al.]; edited by B.I. Cherpakova. Moscow: SUE «VIMI», 1999, 512 p.
12. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Raid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stuker. N.Y.: Springer, 2015. 498 p.
13. Kheifets M.L., Krutko V.S., Gretskey N.L. Design of technological processes and equipment using fields and energy flows based on the analysis of similarity criteria // Reports of the National Academy of Sciences of Belarus, 2021, vol. 65, no. 5, pp. 628–635.
14. Neumann von J. Theory of self-reproducing automata. Moscow: Mir, 1971. 342 p.
15. Wiener N. Cybernetics or control and communication in the animal and the machine. Moscow: Sovetskoe radio, 1958, 296 p.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.06.2023; одобрена после рецензирования 26.06.2023; принята к публикации 01.07.2023

The article was submitted 22.06.2023; approved after reviewing 26.06.2023; assepted for publication 01.07.2023

