

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 621.91.01
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-739-746>

Поступило в редакцию 07.10.2020
Received 07.10.2020

М. Л. Хейфец

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ТРАДИЦИОННОГО И АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

(Представлено академиком П. А. Витязем)

Аннотация. Проведен анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования для традиционного производства, изучены особенности формирования технологического оборудования, использующего потоки энергии и расходных материалов. Структурный синтез мехатронных комплексов в цифровизированном производстве позволил дополнить новыми этапами процесс создания технологического оборудования как для традиционного автоматизированного субтрактивного, так и нового аддитивного производства. Описанные алгоритмами по предложенной структурной диаграмме связей процессы изготовления деталей без формообразующей оснастки предоставляют возможность анализировать существующее и разрабатывать новое оборудование для послойного синтеза изделий. Показано, как при проектировании технологического оборудования для его использования в новом аддитивном и традиционном субтрактивном производстве применяются методы и схемы послойного синтеза и формообразования деталей из композиционных материалов, построенные на использовании различных потоков энергии и компонентов материала, а также методы и схемы автоматизации и компьютерного управления процессами производства изделий.

Ключевые слова: технологическое оборудование, аддитивное и субтрактивное производство, послойный синтез, формообразование изделий

Для цитирования. Хейфец, М. Л. Проектирование мехатронных технологических комплексов для традиционного и аддитивного производства / М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 739–746. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-739-746>

Mikhail L. Kheifetz

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic Belarus

DESIGN OF MECHATRONIC TECHNOLOGICAL COMPLEXES FOR TRADITIONAL AND ADDITIVE MANUFACTURING

(Communicated by Academician Petr A. Vityaz)

Abstract. The analysis of the stages and stages of the design of technological equipment for traditional production, studied the features of the formation of technological equipment using flows of energy and consumables. Structural synthesis of mechatronic complexes in digitalized production allowed adding new stages to the process of creating technological equipment for both traditional automated subtractive and new additive manufacturing. The processes of manufacturing parts without shaping equipment described by the algorithms according to the proposed structural diagram of connections provide an opportunity to analyze existing and develop new equipment in laminate synthesis of products. It is shown, how in the design of technological equipments for their use in new additive and traditional subtractive manufacturing, methods and schemes of laminate synthesis and shaping of parts from composite materials are used, based on the use of various energy flows and material components, as well as methods and schemes of automation and computer product manufacturing process management.

Keywords: technological equipment, additive and subtractive manufacturing, laminate synthesis, product shaping

For citation: Kheifetz M. L. Design of mechatronic technological complexes for traditional and additive manufacturing. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 739–746 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-739-746>

Введение. При проектировании, включающем структурный синтез и параметрическую оптимизацию, технологических комплексов оборудования, используемого в традиционном субтрактивном и в новом аддитивном производстве, применяются как широко известные, так и но-

вые методы и схемы формообразования и послойного синтеза изделий, а также интенсивные процессы модифицирования свойств материалов концентрированными и распределенными потоками энергии [1–5].

Традиционно исходные данные для проектирования технологического оборудования содержит техническое задание конкретного заказчика, включающее только: 1) данные о материалах и готовых изделиях; 2) производительность оборудования; 3) характер и тип производства; 4) уровень автоматизации и встраиваемость в современное высокотехнологичное производство [6; 7].

Однако этих сведений недостаточно при проектировании комплексов технологического оборудования, использующего распределенные поля и концентрированные потоки энергии [1–3], для компьютерно управляемого субтрактивного и аддитивного производства [4; 5]. Связано это с тем, что как для традиционных типов субтрактивного, так и новых типов аддитивного производства, заключающихся в послойном наращивании поверхности изделий, при проектировании требуется дополнительно рассматривать подвод и распределение материала и энергии [8; 9].

В связи с этим целью работы являлось развитие существующей методологии проектирования комплексов технологического оборудования при компьютерном управлении технологическими процессами как для традиционных методов комбинированного электро-физико-химического формообразования деталей, так и для новых методов послойного синтеза изделий из композиционных материалов в аддитивном производстве.

Анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования для производства традиционного типа. Последовательность расчета технологического оборудования для производства традиционного типа включает 8 укрупненных стадий, опирающихся на расчетные схемы [4; 6; 7]:

1. Компонировка и выбор кинематической схемы.
2. Модульное построение по ограничительному набору агрегатов и узлов [10; 11].
3. Расчеты статических упругих перемещений, выбор схемы и прочностные расчеты.
4. Динамические расчеты устойчивости движений системы и статических отклонений элементов, выбор схемы и динамические расчеты.
5. Тепловые расчеты, выбор термодинамической схемы и расчет температур.
6. Точностные расчеты, включающие определение точности геометрических и кинематических связей с учетом деформаций: общей, термической и в контакте.
7. Расчеты надежности и долговечности, включающие определение надежности агрегатов и узлов, с учетом тепловых и деформационных процессов трения и изнашивания, и в завершение экономическое обоснование ресурса.
8. Анализ человеко-машинной системы, включающей также охрану труда и технику безопасности на производстве [6].

Далее по стадиям для технологического оборудования ведется расчет основных систем: 1) несущих; 2) направляющих движений; 3) приводов движений и других.

Проектирование и расчет основных систем производится по техническим требованиям для механических агрегатов, технологической оснастки и средств автоматизации; систем смазки, электрооборудования и программируемых систем; систем диагностики, с учетом техники безопасности, эргономики и технологичности станка [4; 6; 7].

Для этого в первую очередь строятся схемы систем с учетом ограничительных наборов агрегатов и узлов: 1) кинематическая, 2) технологических модулей [10; 11], 3) прочностная, 4) динамическая, 5) термодинамическая, 6) контакта и трения, 7) изнашивания и надежности, 8) человеко-машинная система в целом [6].

Затем после структурного синтеза проводится параметрическая оптимизация [12; 13], определяются основные параметры систем технологического оборудования.

Так, определение параметров кинематического модуля часто связано с оптимизацией его структуры, в частности, за счет рационального размещения в нем органов настройки [14]. Задача эта относится к структурно-параметрическому синтезу и оптимизации, в результате которых формируется рациональная структура объекта и находятся значения параметров его элементов, удовлетворяющие требованиям синтеза с оптимизацией при настройке.

Путь решения этой задачи рассмотрим на примере дифференциального механического модуля с двумя ведущими звеньями 1 и 3, выходным звеном 6 и двумя органами настройки i_x и i_y (рис. 1), который может использоваться для параллельного соединения двух кинематических групп [14].

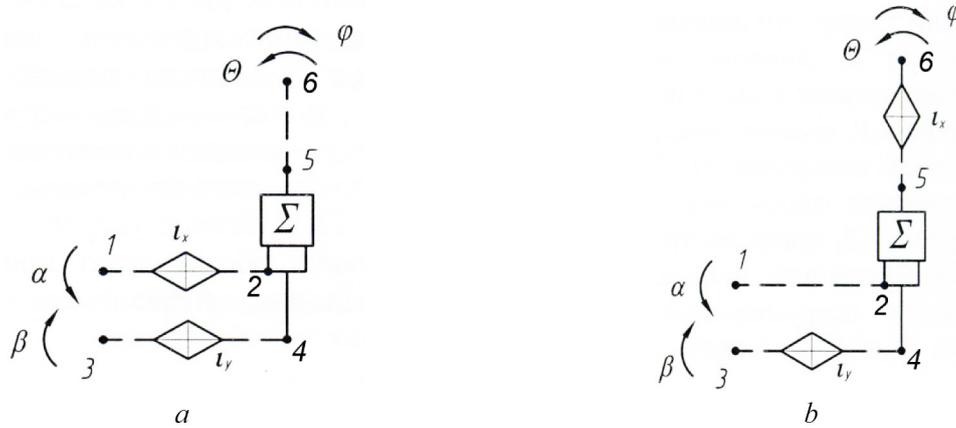


Рис. 1. Кинематические схемы соединения внутренних связей звеньев 1–6 кинематической цепи с расположением органов настройки i_x и i_y в автономных участках (а) и в общем участке (б)

Fig. 1. Kinematic diagrams of the connection of the internal connections of links 1–6 of the kinematic chain with the arrangement of the adjustment elements i_x and i_y in autonomous areas (a) and in a common area (b)

Кинематические связи модуля $1 \rightarrow 2 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 6$ и $3 \rightarrow 4 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 6$ имеют общий участок 5–6 и присоединенные к нему через суммирующий механизм Σ автономные участки 1–2 и 3–4. Орган настройки i_x первой кинематической группы может быть расположен или в ее автономном участке 1–2 (рис. 1, а) или в общем участке (рис. 1, б). Аналогично орган настройки i_y второй кинематической группы также может быть расположен в ее автономном участке 3–4 или в общем участке.

Поэтому проанализируем различные варианты размещения органов настройки i_x и i_y [14]. Пусть с начала они находятся в указанных автономных участках внутренних связей, тогда структуру этих связей можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \alpha \rightarrow 1 \rightarrow i_x \rightarrow 2 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow \varphi + \theta \\ \uparrow \\ \beta \rightarrow 3 \rightarrow i_y \rightarrow 4. \end{aligned}$$

Когда один из органов настройки находится в общем участке 5–6, и если в нем расположить орган i_x , то получается следующая структура внутренних связей модуля:

$$\begin{aligned} \alpha \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow \Sigma \rightarrow 5 \rightarrow i_x \rightarrow 6 \rightarrow \varphi + \theta \\ \uparrow \\ \beta \rightarrow 3 \rightarrow i_y \rightarrow 4. \end{aligned}$$

При расположении органов настройки по первому варианту требуется перенастраивать оба органа настройки, что связано с увеличением трудоемкости, также зачастую невозможно обеспечить одинаковые значения передаточного отношения органа настройки и, следовательно, идентичность обработанных изделий по определенному параметру x . Поскольку во втором варианте значение i_y не зависит от параметра x , то при переходе к обработке изделия с иным значением этого параметра, требуется изменить передаточное отношение только органа i_x .

Каждый вариант структуры кинематического модуля характеризуется определенными значениями параметров органов настройки, по-разному влияющих на функциональные свойства проектируемого объекта, в данном случае формообразующей системы комплекса технологического оборудования [14]. Таким образом, синтез проектируемого объекта сводится к целенаправленному анализу возможных вариантов его структуры и определению варианта с рациональными значениями настраиваемых параметров.

Следует отметить, что при создании для автоматизированного субтрактивного и аддитивно-го производства, комплексов технологического оборудования, использующего концентрированные и распределенные потоки энергии [1–3], укрупненных 8 стадий с определением параметров систем, выбором структур и соответствующих им схем недостаточно [4; 5]. Связано это с тем, что для традиционных типов субтрактивного и новых типов аддитивного производства, заключающихся в послойном наращивании поверхности изделий, на последующих дополнительно вводимых этапах проектирования требуется рассматривать схемы и определять параметры модулей технологического оборудования, описывающие подвод и распределение материала и энергии [8; 9].

Особенности проектирования комплексов технологического оборудования, использующего потоки энергии. Широко применяемые в мировом производстве технологии позволяют заключить, что наиболее перспективно применение оборудования по наращиванию слоев и формообразованию поверхностей изделий, использующего различные сочетания потоков материала и энергии. Это в свою очередь ставит задачи распределения компонентов материала и источников энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, а также по характеру импульсов подачи материала и энергии [4; 5; 8; 9].

Задачи распределения потоков материала и энергии помогают решить критерии тепломассопереноса, устанавливающие последовательность структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при увеличении мощности воздействий [4; 8; 15]:

$$\begin{array}{c} \overbrace{\text{(Re In)} \quad \text{(Re In)}} \\ \text{Pe (1 / Pr)} \Rightarrow \text{Re(Pr Ds)} \Rightarrow \text{Mr(Re / Pr)(In / Ds)} \Rightarrow \text{Gr(Pr)} \Rightarrow \text{Rl} , \\ \underbrace{\text{(Ds)} \quad \text{(Re In / Ds)}} \end{array} \quad (1)$$

в которой $\text{Pe} = \omega t / \omega$ – критерий Пекле; $\text{Pr} = \nu / \omega$ – критерий Прандтля; $\text{Re} = \omega t / \nu$ – критерий Рейнольдса; $\text{In} = \beta g \nabla T t^2 / \nu^2$ – отношение подъемной силы плавучести к инерционной силе; $\text{Ds} = \sigma_k \nabla T t / (\nu \rho / \nu)$ – отношение сил капиллярности и вязкости; $\text{Mr} = \sigma_k \nabla T t^2 / (\rho \omega \nu)$ – критерий Марангони; $\text{Gr} = \beta g \nabla T t^4 / \nu^2$ – критерий Грасгофа; $\text{Rl} = \beta g \nabla T t^4 / (\omega \nu)$ – критерий Рэлея; где t – характерный размер; ω – коэффициент температуропроводности; ν – скорость; ν – коэффициент кинематической вязкости; β – коэффициент объемного расширения; g – ускорение свободного падения; T – абсолютная температура; σ_k – коэффициент термокапиллярности; ρ – плотность технологической среды.

Критерии, характеризующие потоки энергии, при электро-физико-химической обработке оказывают существенное влияние на последовательность пространственных явлений и помогают управлять формированием свойств обрабатываемого материала [4; 8; 15]:

$$\text{Sm}(Em / Se) \Rightarrow \text{Si} \text{ и } \text{Mr}(Ek) \Rightarrow \text{E}(Tk / Ek) \Rightarrow \text{Rl}, \quad (2)$$

в которых $\text{Sm} = IB / (\nu^2 \rho t)$ – критерий магнитного воздействия; $\text{Em} = \nu E_1 / (B)$ – отношение скорости потока к его теплосодержанию и напряженности электрического поля к его магнитной индукции; $\text{Se} = E_1 t^2 / (IR)$ – критерий напряженности электрического поля; $\text{Si} = P R / (\nu \rho H' t^3)$ – энергетический критерий; $\text{Ek} = \varepsilon \gamma^2 \nabla T / \sigma_k$ – отношение термоэлектрической и капиллярной сил; $\text{E} = \varepsilon \gamma^2 \nabla T^2 t^2 / (\rho \omega \nu)$ – термо-электрический критерий; $\text{Tk} = \rho \beta g t^2 / \sigma_k$ – отношение подъемной силы плавучести к капиллярной силе; где I – сила тока; B – магнитная индукция; H' – энтальпия потока; R – электросопротивление; ε – диэлектрическая проницаемость; γ – коэффициент термоэлектродвижущей силы; E_1 – напряженность электрического поля.

Использование последовательностей критериев переноса (1) и (2) для анализа процессов образования структур и фаз материала многократно сокращает объем экспериментальных исследований технологии формирования поверхностного слоя при комбинированных методах термо-механической и электро-физико-химической обработки [4; 8; 15].

При образовании неустойчивых структур поверхностных слоев целесообразно по критерию Рейнольдса $Re = vt / \nu$ определять турбулентность течений и потоков обрабатываемого материала и описывать волнистость и шероховатость формирующегося рельефа поверхности R . Толщина формируемого слоя t определяет увеличение или снижение его массы Q , а с учетом сплошности или пористости послойноформируемого материала или покрытия изменяется их относительная твердость $H_\varepsilon = \Delta H / H$. Поэтому толщина слоя t пропорциональна выражению $Q / (1 - H_\varepsilon)$ [2; 4; 15].

В результате при управлении потоками энергии целесообразно использовать соотношения, пропорциональные критериям переноса, для оптимизации геометрических характеристик рельефа поверхности:

$$R \sim \frac{\nu_S [Q / (1 - H_\varepsilon)]}{(B / I)(\nu / S)} = \frac{\nu_S I Q}{\nu B (1 - H_\varepsilon)} \quad (3)$$

и для оптимизации физико-механических параметров относительного упрочнения материала поверхностного слоя из соотношения (3) получаем:

$$H_\varepsilon \sim 1 - \frac{\nu_S S I Q}{\nu B R}, \quad (4)$$

где ν_S – суммарная скорость главного ν и дополнительного S движений.

Соотношения (3) и (4) показывают положительную обратную связь рельефа R и отрицательную обратную связь упрочнения H_ε с производительностью обработки $\nu_S Q$, а также с регулируемые кинематическими характеристиками оборудования (S / ν) и мощностью источника энергии (I / B) [2; 4; 15].

Анализ соотношений (3) и (4) позволяет выделить основные принципы организации обратной связи в открытой технологической системе.

В случае, когда в первую очередь необходимо сформировать поверхность (3), а затем ее упрочнить (4), как, например, при деформировании и резании, в технологической системе при термомеханических воздействиях создается положительная обратная связь. Избыточные степени свободы инструмента и технологической среды, подавляя рассеяние потоков энергии и вещества в формоизменяемом припуске, создают упрочняющие структуры в поверхностном слое и повышают производительность обработки [2; 4; 9].

В том случае, когда сначала требуется упрочнить (4), а затем сформировать рельеф поверхности (3), как, например, при нанесении покрытий, в технологической системе при электро-физико-химических воздействиях организуется отрицательная обратная связь. Дополнительные воздействия источниками энергии и веществами, формируя упрочняющие структуры в поверхностном слое, не допускают развития неустойчивости процесса при образовании рельефа поверхности и при его стабилизации не позволяют поднять производительность обработки [2; 4; 5].

С учетом контуров прямых и обратных связей в технологической системе, требуется также изучать схемы числового программного управления и рассматривать комплекс технологического оборудования как мехатронную систему [1; 2; 4].

Проектирование комплексов технологического оборудования для аддитивного производства изделий. Если рассматривать комплекс технологического оборудования с позиций компьютеризации производственной деятельности, то оборудование для аддитивного производства, его узлы и детали следует проектировать как устройства компьютерной периферии, построенные по той же архитектуре, что и ЭВМ.

Для обозначения процессов аддитивного производства изделий в технологической системе чаще всего употребляют термины: прямое получение изделий сложной формы – «выращивание» (Solid Freeform Fabrication); послойное создание – «синтез» (Laminate Synthesis); быстрое макетирование – «прототипирование» (Rapid Prototyping); формирование трехмерных объектов – «печать» (3D Component Forming). Поэтому следует определить взаимосвязи процессов формообразования и провести разграничения используемых терминов [4; 5; 16].

Для самовоспроизведения объектов, согласно модели фон Неймана [16], требуются машины: С – «копировщица плана построения»; О – «исполнительница плана построения»; S – «пусковое

устройство» (включающее С и О в надлежащее время); V_{C+O+S} – «план построения автомата» (описывающий все элементы модели). В результате весь автомат выражается символически $S + O + S + V_{C+O+S}$. После начального запуска S получает в свое распоряжение план построения автомата в целом V_{C+O+S} , С копирует его, а О в свою очередь следует ему для построения С, О и S. Тогда, можно представить [4; 5; 16]: запуск (S) как прямой доступ к потокам вещества и энергии; получение плана (V_{C+O+S}) как самонастройку программы воспроизведения; копирование плана (С) как трансляцию информационного потока; построение автомата (О) как самоорганизацию его структуры.

Исследование процессов производства деталей без использования формообразующей оснастки [4; 5; 16] в зависимости от агрегатного состояния исходного материала, размерности потоков формообразующей среды и последовательности технологических операций позволило представить совокупность методов «выращивания» деталей в виде структурной диаграммы связей (рис. 2).

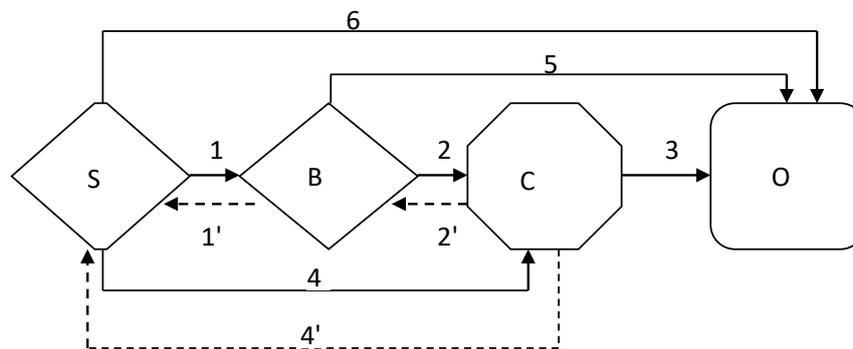


Рис. 2. Структурная диаграмма связей в способах изготовления деталей машин без формообразующей оснастки

Fig. 2. Structural diagram of connections in the methods of manufacturing machine parts without shaping equipment

Структурная диаграмма связей представляет собой направленный замкнутый граф и описывает автомат с конечным числом состояний [4; 5; 16]. Вершины графа изображают процессы создания деталей без формообразующей оснастки и представляют логические операции: трансляцию информации, потоков вещества и энергии; запуск и остановку автоматического цикла.

Ребра графа отражают изменения состояний ($1-6$ и $1', 2', 4'$) материала технологической среды, а маршруты предусматривают различные комбинации изменений в зависимости от выбора начального и порядка выполнения последующих процессов. Так, разные варианты технологических маршрутов имеют вид различных последовательностей при выборе в качестве начального процесса (рис. 2):

прямого получения деталей сложной формы: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3; 4 \rightarrow 3; 1 \rightarrow 5; 4 \rightarrow 2' \rightarrow 5; 6;$

послойного создания: $1' \rightarrow 4 \rightarrow 3; 2 \rightarrow 3; 1' \rightarrow 6; 2 \rightarrow 4' \rightarrow 6; 5;$

быстрого макетирования: $2' \rightarrow 1' \rightarrow 6; 4' \rightarrow 6; 2' \rightarrow 5; 4' \rightarrow 1 \rightarrow 5; 3.$

Рассматривая замену в модели самовоспроизведения процессов (прямого доступа к потокам вещества и энергии; самонастройки программы воспроизведения; трансляции информационного потока; самоорганизации структуры автомата) обеспечивающими их элементами традиционной неадаптивной технологической системы (деталью, инструментом, приспособлением, станком), приходим к выводу, что невозможно только при использовании формообразующей оснастки создать конечный автомат, так как для изготовления детали должна существовать оснастка, а, в свою очередь, для ее создания должна быть также изготовлена оснастка и т. д.

Таким образом, предложенные согласно модели самовоспроизведения фон Неймана алгоритмы [4; 5; 16] позволяют описывать способы изготовления деталей машин без формообразующей оснастки, а обратные им последовательности – неадаптивные способы, использующие оснастку, непредставимы в качестве конечного автомата.

Описание в соответствии с существующими терминами процессов изготовления деталей без формообразующей оснастки алгоритмами по предложенной структурной диаграмме связей пре-

доставляет возможность анализировать существующие и разрабатывать новые технологические комплексы для прямого «выращивания» изделий [4; 5].

Проектирование комплексов мехатронного технологического оборудования в цифровизированном производстве. Мехатронные системы включают механическую, электромеханическую, электронную и управляющую части [2; 4]. 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 электромеханических и электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется непрерывный обмен энергией и информацией. Функционально простую мехатронную систему технологического комплекса можно подразделить на следующие составные части: 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 обеспечивает согласованную работу аппаратных средств и синхронизацию процессов сбора и обработки данных, поступающих от информационных устройств, с процессами, управляющими исполнительными устройствами.

В технологических системах заранее определить число и вид необходимых исполнительных устройств и датчиков невозможно [2; 4]. Поэтому возникает необходимость решить две задачи: 1) обработать и систематизировать информацию, поступающую с датчиков; 2) обеспечить синхронизацию между этой информацией и движением исполнительных устройств. Это достигается программным обеспечением, управляющим работой соответствующих вычислительных средств. Следовательно, ключевую роль в обеспечении многофункциональной работы мехатронной системы играют алгоритмические и программные средства.

Заключение. Таким образом, анализ стадий и этапов проектирования технологического оборудования для производства традиционного типа и изучение особенностей формирования комплексов технологического оборудования, использующего потоки энергии и расходных материалов, исследование структурного синтеза мехатронных комплексов в цифровизированном производстве позволили дополнить новыми этапами процесс проектирования комплексов автоматизированного технологического оборудования как для традиционного субтрактивного, так и нового аддитивного производства.

Дополнительные этапы проектирования включают: сначала – выбор источников энергии и расходных материалов для интенсификации процессов с анализом технологической среды, использующей потоки энергии и материала; затем – выделение прямых и обратных связей в компьютеризированной технологической системе при электро-физико-химических и термомеханических воздействиях; в заключение – анализ процессов адаптации комплекса оборудования в производственной системе, включающих самонастройку программы и самоорганизацию структуры автоматизированного комплекса.

В результате на основе дополнительных этапов производятся: структурный анализ открытой производственной системы и синтез технологических комплексов, использующих источники энергии и расходных материалов; параметрическая оптимизация модулей и установок, инструментов и средств оснащения технологического комплекса; компоновка производственных модулей и синтез адаптивной мехатронной системы высокоэффективной обработки.

Список использованных источников

1. Проектирование технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий на основе многофакторной оптимизации / П. И. Ящерицын [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 1997. – Т. 41, № 3. – С. 112–118.
2. Проектирование мехатронных технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий / П. И. Ящерицын [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2003. – Т. 47, № 6. – С. 120–124.
3. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П. И. Ящерицын [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 4. – С. 106–109.

4. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2012. – 239 с.
5. Витязь, П. А. «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – № 2. – С. 54–72.
6. Машиностроение: энциклопедия / Б. И. Черпаков [и др.]; под ред. Б. И. Черпакова. – М., 2002. – Т. IV-7: Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование. – 864 с.
7. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем / А. С. Проников [и др.]; под ред. А. С. Проникова. – М., 1994. – Т. 1: Проектирование станков. – 444 с.
8. Технологические основы управления качеством машин / А. С. Васильев [и др.]. – М., 2003. – 256 с.
9. Хейфец, М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М. Л. Хейфец. – М., 2005. – 272 с.
10. Базров, Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – М., 2001. – 368 с.
11. Базров, Б. М. Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 377–384. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>
12. Артоболевский, И. И. Основы синтеза систем машин автоматического действия / И. И. Артоболевский, Д. Я. Ильинский. – М., 1983. – 280 с.
13. Врагов, Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: Основы компонетики / Ю. Д. Врагов. – М., 1978. – 208 с.
14. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2014. – 316 с.
15. Использование критериев подобия для комбинированных методов обработки материалов / А. И. Гордиенко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2004. – Т. 48, № 4. – С. 107–110.
16. Хейфец, М. Л. Анализ алгоритмов производства изделий по модели самовоспроизведения фон Неймана / М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 5. – С. 119–122.

References

1. Yashcheritsyn P. I., Kheifets M. L., Kozhuro L. M., Chemisov B. P. Designing technological complexes of high-effective treatment of products on the basis of products multifactorial optimization. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 1997, vol. 41, no. 3, pp. 112–118 (in Russian).
2. Yashcheritsyn P. I., Kheifets M. L., Zeveleva E. Z., Akulovich L. M. Designing of mechatronic technological complexes of high-performance processing. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2003, vol. 47, no. 6, pp. 120–124 (in Russian).
3. Yashcheritsyn P. I., Averkhenkov V. I., Kheifets M. L., Kukhta S. V. Analysis of the properties of ratios of technological solutions in designing combined methods of the treatment of materials. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2001, vol. 45, no. 3, pp. 106–109 (in Russian).
4. Rusetsky A. M., ed. *Theoretical bases of technological systems designing*. Minsk, 2012. 239 p. (in Russian).
5. Vitiaz P. A., Kheifetz M. L., Chizhik S. A. “Industry 4.0”: from information and communication and additive technologies to self-reproduction of machines and organisms. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 2, pp. 54–72 (in Russian).
6. Cherpakov B. I., ed. *Mechanical engineering: Encyclopedia. Vol. IV-7: Metal-cutting machines and woodworking equipment*. Moscow, 2002. 864 p. (in Russian).
7. Pronikov A. S., ed. *Design of metal-cutting machine tools and machine-tool systems. Vol. 1: Machine tools design*. Moscow, 1994. 444 p. (in Russian).
8. Vasil'ev A. S., Dal'sky A. M., Klimenko S. A., Polonsky L. G., Kheifetz M. L., Yashcheritsyn P. I. *Technological fundamentals of machine quality management*. Moscow, 2003. 256 p. (in Russian).
9. Kheifetz M. L. *Design process of combined processing*. Moscow, 2005. 272 p. (in Russian).
10. Bazrov B. M. *Modular technology in mechanical engineering*. Moscow, 2001. 368 p. (in Russian).
11. Bazrov B. M., Kheifetz M. L. Method of presenting a product as an object of digitalization of manufacturing by a structured set of modules. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 377–384 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>
12. Artobolevsky I. I., Il'insky D. Ia. *Bases of synthesis of systems of cars of automaticaction*. Moscow, 1983. 280 p. (in Russian).
13. Vragov Yu. D. *Analysis of configurations of metal-cutting machines: Komponetika bases*. Moscow, 1978. 208 p. (in Russian).
14. Rusetsky A. M., ed. *Design and equipment of technological systems*. Minsk, 2014. 316 p. (in Russian).
15. Gordienko A. I., Kozhuro L. M., Kheifetz M. L., Kukhta S. V. Use of analogy parameters for development of combined physical-chemical material processing methods. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2004, vol. 48, no. 4, pp. 107–110 (in Russian).
16. Kheifets M. L. Analysis of the algorithms of production of machine parts by models of von Neumann's self-reproduction. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2001, vol. 45, no. 5, pp. 119–122 (in Russian).

Информация об авторе

Хейфец Михаил Львович – д-р техн. наук, профессор, директор. Институт прикладной физики НАН Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mlk-z@mail.ru.

Information about the author

Kheifetz Mikhail L. – D. Sc. (Engineering), Professor, Director. Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic Belarus). E-mail: mlk-z@mail.ru.