

УДК.621.783:621.922:658.512:536.75

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

*д-р техн. наук, проф. М.Л. ХЕЙФЕЦ, Е.З. ЗЕВЕЛЕВА (Полоцкий государственный университет),  
д-р техн. наук, проф. Л.М. АКУЛОВИЧ (Конструкторско-технологический институт  
средств механизации и автоматизации, г. Минск)*

*Проанализирована технологическая система, использующая концентрированные источники энергии, и рассмотрены мероприятия по обеспечению эффективности гибкого производства. Предложены этапы проектирования технологических комплексов высокоэффективной обработки. Разработан технологический комплекс комбинированной электромагнитной и термомеханической обработки для упрочнения изделий машиностроения.*

Повышению эффективности производства служит создание комплексов технологических, транспортных, энергетических и информационных машин, выполняющих ту логически завершенную часть производственных действий, которой является технологический процесс [1,2]. Такая совокупность производящих машин получила название технологических комплексов (ТК) [2]. Соединение технологических и транспортных составляющих комплекса в пространстве и совмещение их воздействий во времени обеспечивает производству компактность [3]. Использование концентрированных источников энергии в компактных комплексах радикально интенсифицирует технологические процессы [4]. Объединение потоков вещества и энергии с информационными потоками обеспечивает производству интеллектуальность [5]. Соединение узлов точной механики с электротехническими, электронными и компьютерными компонентами для проектирования и производства качественно новых модулей оборудования и комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциями обеспечивают мехатронные системы [6]. Поэтому актуальной комплексной проблемой современного машиностроения является всемерное сокращение сроков и средств на оптимальное проектирование, изготовление и внедрение гибких компактных мехатронных технологических комплексов [7] на базе интенсивных технологических процессов в интеллектуальном компьютерно-интегрированном производстве.

Процесс изготовления машины при интенсивной обработке сопровождается взаимодействиями различных объектов технологического комплекса. Совокупность технологических объектов, связанных на отдельном этапе изготовления с выделенным объектом, представляет собой технологическую среду [6]. Когда в качестве выделенного объекта рассматривают обрабатываемое изделие, тогда средой является все, что не принадлежит изделию, но с чем у него имеются связи (рис. 1).

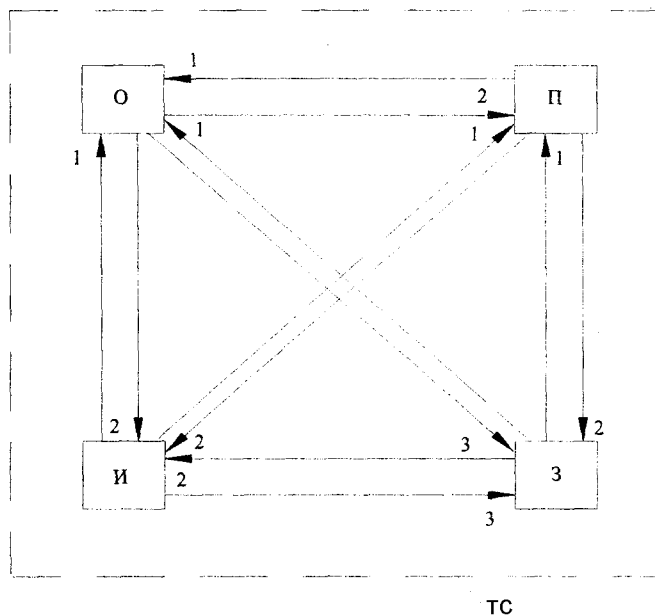


Рис. 1. Структура технологической среды (ТС) совмещенных и комбинированных воздействий, включающая: О - оборудование; И - инструмент; П - приспособление; 3 - заготовку и осуществляющая: 1 - установку; 2 - закрепление, движение; 3 - обработку изделия

При использовании для обработки изделия источников энергии взаимодействие объектов происходит как при непосредственном контакте, так и посредством распределенного (поле), концентрированного (пучок) или сфокусированного (луч) потока энергии [4, 8].

Выбор технологических источников, обладающих рациональными резервами для выполнения заданного множества функций [4] и требующих определенных условий для проведения технологических воздействий, целесообразно проводить на основе конструкторско-технологической классификации, представленной в таблице.

Конструкторско-технологическая классификация источников энергии

Технологические источники	Технологическая среда	Вид источника энергии	Плотность мощности источников энергии $q$ , Вт/см <sup>2</sup>
1. Поле (распределенный поток)	Не требует изменений рабочей зоны	Электрохимический	$(10^1) \dots 10^2 \dots 10^3$
		Индукционный нагрев	$(10^2) \dots 10^3 \dots 10^4$
		Электромагнитный	$10^3 \dots 10^5 \dots (10^6)$
2. Поток (концентрированная струя)	Требует изменения участков рабочей зоны	Газоплазменный	$10^2 \dots 10^3 \dots (3 \cdot 10^3)$
		Плазменный	$5 \cdot 10^2 \dots 3 \cdot 10^3$
		Электродуговой	$10^3 \dots 10^5 \dots (10^7)$
3. Луч (сфокусированный пучок)	Требует изоляции рабочей зоны	Ионный	$(10^2) \dots 10^3 \dots 10^5$
		Электронный	$(10^3) \dots 10^5 \dots 8 \cdot 10^8$
		Лазерный	$(5 \cdot 10^3) \dots 10^6 \dots 10^9$

В результате при проектировании процессов высокоэффективной обработки, помимо взаимодействия элементов технологической системы (оборудования, приспособления, инструмента и заготовки), необходимо рассматривать реологию распределенной технологической среды с учетом выбранного источника энергии [9].

Движения потоков вещества и энергии в технологической среде сопровождаются явлением внутреннего трения [10]. Динамические касательные  $\tau_d$  и нормальные  $\sigma_d$  напряжения внутреннего трения в движущейся со скоростью  $\vec{v}$  среде характеризуются первой (динамической) вязкостью  $\eta$  и описываются формулой Ньютона:

$$\tau_d = -\eta \sigma_d = -\eta \text{grad} \vec{v}.$$

При сжатии и растяжении среды наряду с  $\sigma_d$  возникают добавочные нормальные напряжения  $\sigma_o$ , вызываемые динамическим трением и характеризующиеся второй (объемной) вязкостью  $\zeta$ :

$$\sigma_o = -\zeta \text{div} \vec{v}.$$

Добавочные касательные напряжения  $\tau_o$  представляются формулой [4, 10]:

$$\tau_o = -\mu \text{rot} \vec{v},$$

в которой  $\vec{v}$  – составляющая вращения в потоках среды, движущихся со скоростью  $\vec{v}$ ;  $\mu$  – третья (ротационная) вязкость:

$$\mu = \left( \frac{\sigma_M}{\sigma_P} \right) \left( \frac{S}{v} \right),$$

где  $(\sigma_M/\sigma_P)$  – соотношение ротационной и трансляционной составляющих напряженного состояния среды на мезоуровне;  $(S/v)$  – соотношение скоростей дополнительного и главного движений элементов технологической системы на макроуровне.

При интенсификации воздействий на технологическую среду с плотностью  $\rho$  и кинематической вязкостью потоков  $\nu$  (при перемещении) и  $\nu^*$  (при вращении) происходит переход объемной вязкости среды  $\zeta = -\sigma_o \rho (d\sigma_d/d\rho)$  в динамическую  $\eta = \nu \rho$  через ротационную вязкость  $\mu = 1/\nu^*$ .

Процессы формирования поверхностного слоя изделия в технологической среде описываются критериями Рейнольдса  $Re$ , Пекле  $Pe$  и Прандтля  $Pr$  [4]:

$$Re = \frac{Pe}{Pr} = \frac{\nu_s t}{\omega Pr} = \frac{\nu_s t}{\nu^*} = \frac{\nu_s t}{(\sigma_P/\sigma_M)(v/S)},$$

в которых  $\vec{v}_s = \vec{v} + \vec{S}$  – результирующая скорость движений формирования поверхности;  $t$  – толщина формируемого или удаляемого слоя с учетом изменения его плотности  $\rho$ ;  $\omega$  – проводимость среды.

Для управления источниками энергии при интенсивной обработке используются критерии, характеризующие электромагнитные потоки: энергетический  $Si$ , магнитного взаимодействия  $Sm$ , напряженности электрического поля  $Se$  и их соотношения:

$$Si = \frac{I^2}{\omega \rho \nu H t^3} = \left( \frac{\nu}{H} \right) \left( \frac{R/t}{\rho \nu^2} \right) \left( \frac{I}{t} \right)^2; \quad Sm = \frac{IB}{\rho \nu^2 t} = \left( \frac{I}{P \nu} \right) \left( \frac{B}{\tau} \right) \left( \frac{I}{t} \right);$$

$$Se = \frac{\omega E t^2}{I} = \left( \frac{E}{R/t} \right) \left( \frac{t}{I} \right); \quad Si \left( \frac{H}{\nu} \right) \left( \frac{B}{E} \right) = \frac{Sm}{Se} = \frac{I^2 B}{\omega E \rho \nu^2 t^3} = \left( \frac{B}{E} \right) \left( \frac{R/t}{\rho \nu^2} \right) \left( \frac{I}{t} \right)^2,$$

в которых  $I$  – сила разрядного тока;  $1/\omega t = R/t$  – удельное электросопротивление рабочего зазора  $t$ ;  $\rho \nu = P \tau$  – импульс силы  $P$  за период времени  $\tau$ ,  $H$  – энтальпия (теплосодержание) потока;  $B$  – магнитная индукция и  $E$  – напряженность электрического поля.

Формирование поверхностного слоя с рельефом шероховатости  $R_a$ , с измененной структурой относительной твердости  $H_e = \Delta H/H$ , целесообразно описывать критерием  $Re$ , определяющим турбулентность поверхностных течений потоков обрабатываемого материала. Тогда толщина формируемого слоя  $t$  при увеличении или снижении его массы  $Q$ , с учетом сплошности или пористости, изменяющих относительную твердость  $H_e$ , будет пропорциональна выражению  $Q/(1 - H_e)$ . Соотношение параметров напряжений ( $\sigma_p/\sigma_m$ ), пропорциональных факторам, определяющим перемещение и вращение частиц вещества технологической среды, согласно критериям  $Sm$ ,  $Se$ ,  $Si$  и  $Sm/Se$ , представляется отношениями для магнитных ( $B/\tau$ ), электрических ( $t/I$ ) и электромагнитных ( $B/E$ ) воздействий. Отношение ( $B/E$ ) заменяется на ( $B/U$ ) при использовании в качестве источника электрической дуги генераторов импульсов и на ( $B/I$ ) при использовании трансформаторов.

В результате при управлении источниками энергии целесообразно использовать соотношения, пропорциональные критериям тепломассопереноса:

- для оптимизации геометрических характеристик рельефа поверхности:

$$R_a \sim \frac{\nu_s [Q/(1 - H_e)]}{(B/I)(\nu/S)} = \frac{\nu_s Q S I}{\nu B (1 - H_e)};$$

- для оптимизации физико-механических параметров относительного упрочнения материала поверхностного слоя:

$$H_e \sim 1 - \frac{\nu_s Q S I}{\nu B R_a}.$$

Соотношения показывают положительную обратную связь рельефа  $R_a$  и отрицательную обратную связь упрочнения  $H_e$  с производительностью обработки  $\nu_s Q$ , а также с регулируемыми характеристиками кинематики оборудования ( $S/\nu$ ) и мощности источника энергии ( $I/B$ ).

Анализ основных принципов организации электрофизических процессов позволил выделить обратные связи в открытой технологической системе и отразить их в структуре мехатронной производственной системы [3, 5, 7].

Функционально простая мехатронная система подразделяется на составные части (рис. 2): исполнительные устройства (объекты управления и приводы) с системой управления (компьютер и микропроцессоры) и информационные устройства (датчики состояния внешней среды и датчики внутреннего состояния объекта управления), образующие прямые и обратные связи мехатронной системы. Взаимодействие между частями и их составляющими осуществляется через устройства сопряжения (интерфейс). Система управления включает как аппаратные средства, так и программное обеспечение, которое управляет согласованной работой аппаратных средств и обеспечивает согласование процессов сбора данных, поступающих от информационных устройств, с процессами управления исполнительными устройствами, используя прямые связи с внешней средой открытой системы и обратные связи внутри технологической системы по предложенным критериальным зависимостям [3, 12].

Ключевой задачей проектирования ТК является разработка структуры, обеспечивающей бесперебойную работу и гибкую переналадку комплекса высокоэффективной обработки [3, 13]. Рациональные надежность и адаптивность комплекса обеспечиваются при синтезе структуры, основанном на анализе элементов и исследовании кортежей ТК [13, 14].

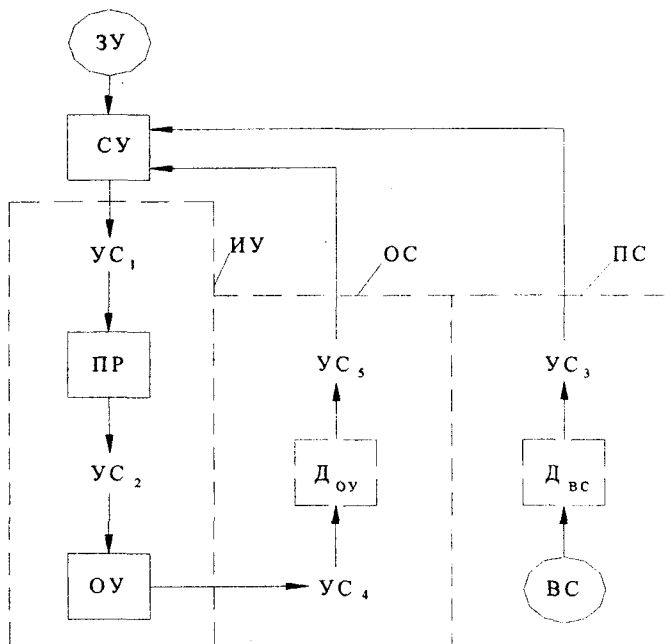


Рис. 2. Составные части мехатронной системы ТК:

ИУ - исполнительные устройства; ОС - обратная связь; ПС - прямая связь; ЗУ - задание на управление; СУ - система управления; УС - устройство сопряжения; ПР - приводы; ОУ - объект управления; Доу - датчики состояния объекта управления; Двс - датчики состояния внешней среды; ВС - внешняя среда

Технологический комплекс в общем случае рассматривается как иерархически построенная система, включающая следующие уровни (рис. 3): I - функциональные элементы (ФЭ), такие как главное движение, движение подачи, движение источника энергии и движение инструмента; II - функциональные подсистемы (ФПС) в виде агрегатных блоков; III - функциональные системы (ФС), обеспечивающие рабочие, транспортные движения, питание и удаление объектов производства, а также обслуживание; IV - технологические модули (ТМ) или агрегатные станки, энергетические и информационные машины; V - автоматические и полуавтоматические линии и участки, образующие ТК.

Каждая подсистема  $n$ -го уровня является элементом подсистемы  $(n + 1)$ -го уровня. Состав ТК, каждой ФС и ФПС, входящих в ТМ, а также функции составляющих их ФЭ соответствуют содержанию тех технологических операций, для которых создается данный технологический комплекс.

Для определения связей между составляющими элементами ФС, ФПС и ФЭ строятся графы кортежей отдельно для каждого технологического модуля, входящего в данный технологический комплекс (см. рис. 3). Статистический анализ графов кортежей позволяет установить количество взаимосвязей между различными уровнями составляющих. Для выяснения целесообразности создания универсального технологического комплекса высокоэффективной комбинированной обработки кортежи объединяют и определяют совпадающие связи и функциональные элементы.

Структурный синтез компактных технологических комплексов, использующих концентрированные источники энергии, дополняется параметрической оптимизацией производственных модулей, реализующих высокоэффективные методы обработки [2, 15].

При создании ТК необходима информация для проектирования технологических процессов, средств их оснащения и автоматизации. Информация должна включать рациональные режимы обработки по всем операциям технологического процесса, сведения о конструкции приспособлений, программное обеспечение и схемы сопряжения рабочих, обслуживающих, информационных машин и агрегатов технологической системы.

При исследовании процессов и объектов в рабочей зоне ТК сначала предлагают аналитические модели, которые затем уточняют путем многофакторного планирования экспериментов, используя дисперсионный, регрессионный и ковариационный анализы [14]. В результате исследование самоорганизации поверхностных явлений по критериям теплопереноса и электромагнитным критериям дополняется статистическим многофакторным анализом процессов и объектов [11].

Структурный синтез и параметрическая оптимизация завершаются пространственно-временным совмещением требуемого сочетания функциональных элементов на множестве компоновок технологического комплекса [2, 15]. Влияние компоновки на производительность и качество обработки проявляется через структуру и конструктивное исполнение технологического комплекса, размерные пропорции и расположение узлов в пространстве [7, 15].

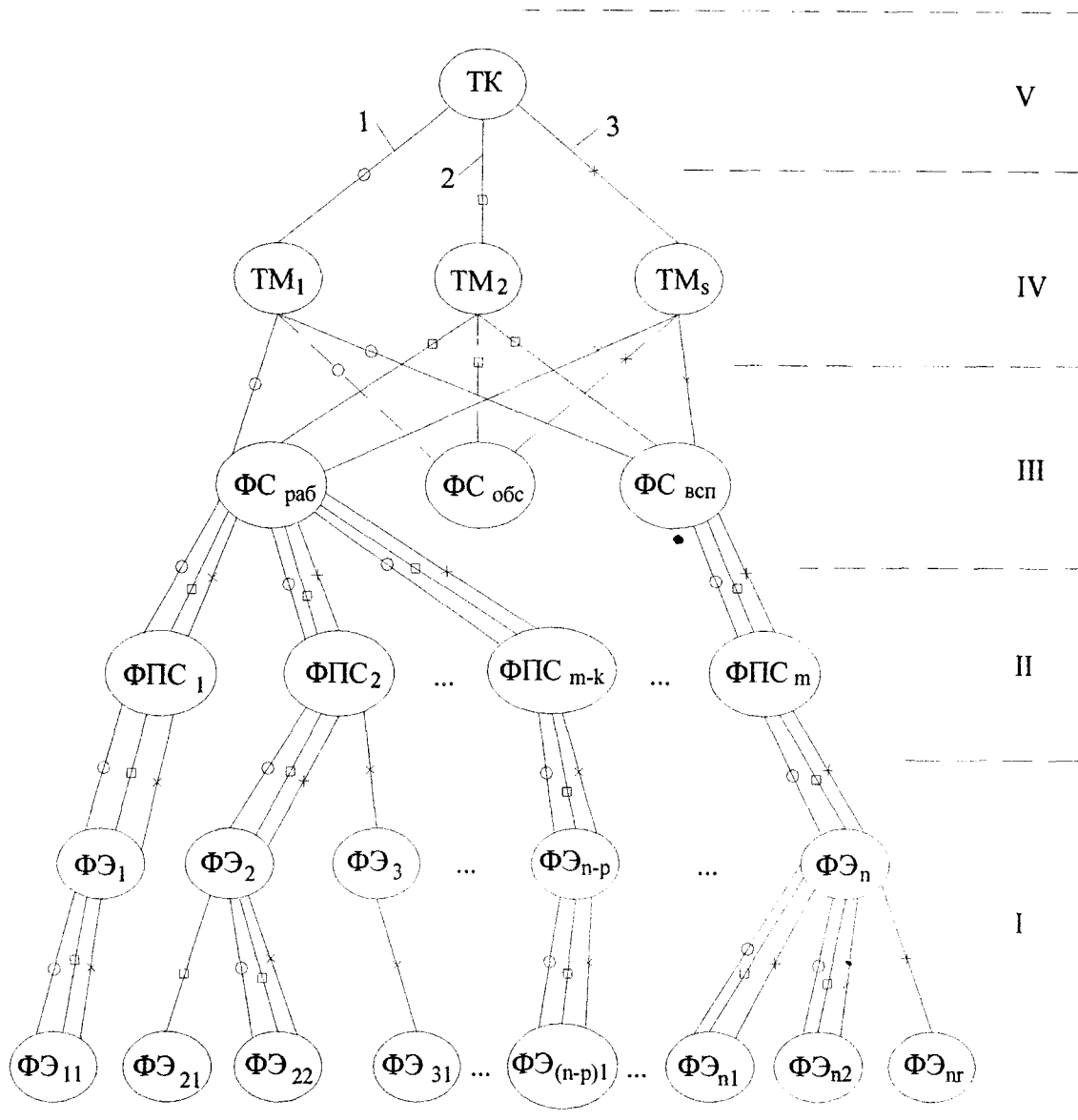


Рис. 3. Графы кортежей технологического комплекса (ТК) V уровня, включающего на IV уровне технологические модули (ТМ) с порядковыми номерами 1, 2, ..., s и функциональные системы (ФС) на III уровне; функциональные подсистемы (ФПС) на II уровне; функциональные элементы (ФЭ) и их составляющие на I уровне

Поскольку формирование поверхности изделия выполняется путем относительных перемещений заготовки, инструмента и источника энергии на  $w$  различных операциях технологического комплекса, то рабочее поле (РП) компоновки технологического модуля образуется в результате взаимодействия поля заготовки (ПЗ), поля инструмента (ПИ) и поля источника энергии (ПЭ).

Из этого следует способ определения пространственных границ  $РП_i$   $i$ -того технологического модуля как области пересечения  $ПЗ_i$ ,  $ПИ_i$  и  $ПЭ_i$ :

$$РП_i = ПЗ_i \cap ПИ_i \cap ПЭ_i,$$

а пространственных границ комплекса  $РП_\Sigma$  как объединения рабочих полей  $РП_i$   $w$  модулей:

$$РП_\Sigma = РП_1 \cup РП_2 \cup \dots \cup РП_i \cup \dots \cup РП_w,$$

где  $ПЗ$  – область пространства, которую может занимать заготовка наибольших размеров при всех ее координатных перемещениях;  $ПИ$  – область пространства, которую может занимать рабочая часть инструмента наибольшего размера при его координатных перемещениях;  $ПЭ$  – область пространства, на которую может воздействовать источник энергии.

В результате анализа компоновок выявляются размеры и конфигурация рабочей зоны, связанные с особенностями технологической среды при использовании источников энергии (см. таблицу).

Элементы интегрированных мехатронных комплексов выбираются на стадии функционального проектирования, а затем обеспечивается необходимая конструкторская и технологическая поддержка при производстве и эксплуатации комплекса [5]. Поэтому составляющие части мехатронных комплексов не просто дополняют друг друга, но и объединяются таким образом, чтобы образованная система обладала качественно новыми свойствами.

В результате мехатронный технологический комплекс, использующий концентрированные источники энергии, конструктивно подразделяется на технологическую и электромеханическую составляющие, а также электронную систему управления. Обобщенная схема производственного модуля ТК (рис. 4) должна содержать все необходимые составляющие мехатронной системы:

- объекты управления (заготовка, инструмент, источник энергии);
- приводы (механизмы перемещения заготовки, инструмента, источника энергии);
- датчики и управляющие устройства (компьютер, блоки управления инструментом и источником энергии), сопряженные между собой;
- систему программного обеспечения.

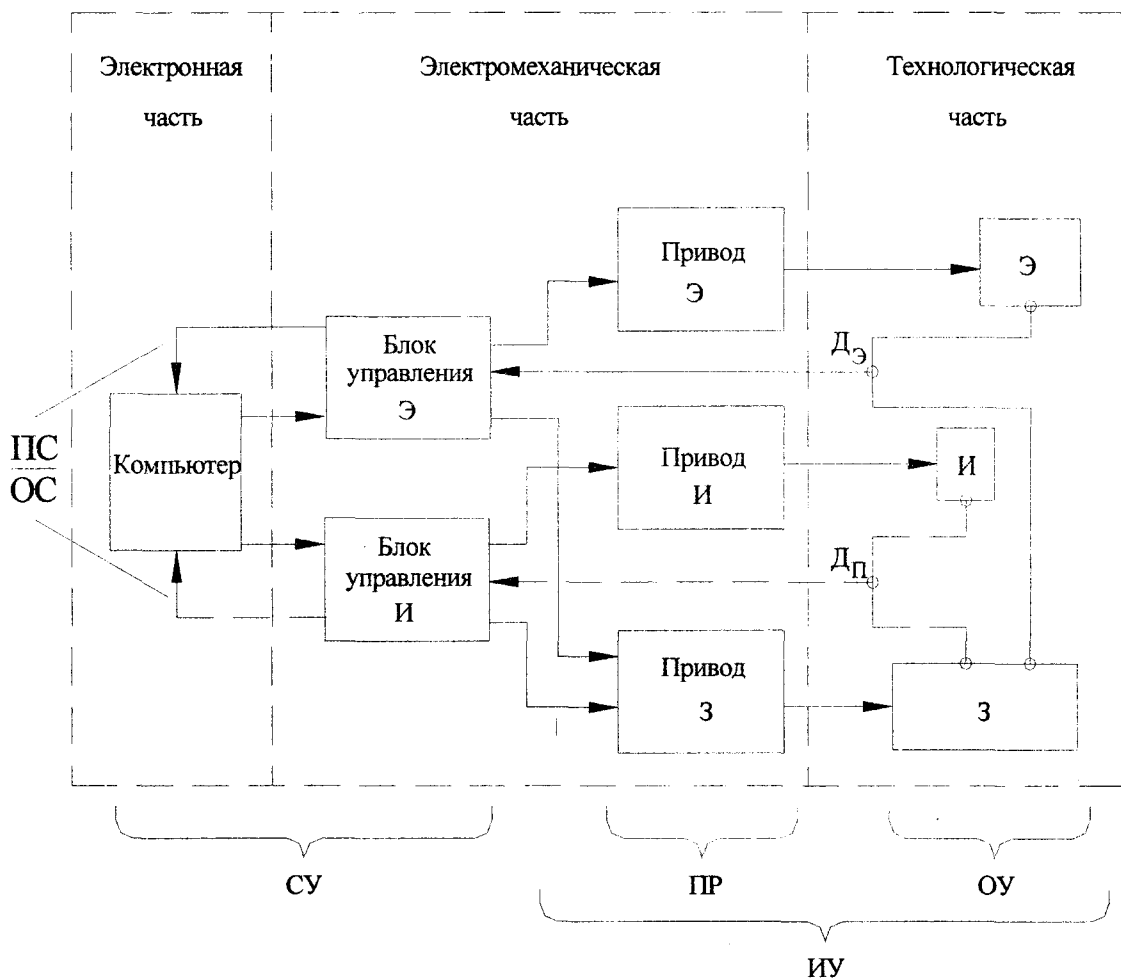


Рис. 4. Структурная схема мехатронной системы:

З - заготовка; И - инструмент; Э - концентрированный источник энергии; Д<sub>п</sub> - датчик перемещений; Д<sub>э</sub> - датчик интенсивности потока энергии; СУ - система управления; ПР - приводы; ОУ - объект управления; ИУ - исполнительные устройства; ПС - прямая связь; ОС - обратная связь

Структурная схема любого гибкого производственного модуля, использующего концентрированные источники энергии, должна иметь рассмотренные элементы, чтобы обеспечить модулю длительное время устойчивой работы в автономном режиме при минимальном количестве управляющих воздействий, поступающих от пространственно удаленных подразделений предприятия.

Таким образом, исследования процессов обработки и объектов технологической системы, использующей концентрированные источники энергии, анализ организационно-технических мероприятий по обеспечению эффективности гибкого производства позволили определить основные этапы проектирования мехатронных технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий:

- выбор источников энергии для интенсификации технологических процессов;
- анализ реологии технологической среды, использующей потоки энергии;
- выделение прямых и обратных связей в технологической системе при интенсивных воздействиях;
- структурный анализ открытой производственной системы высокоэффективной обработки;
- структурный синтез технологических комплексов, использующих источники энергии;
- параметрическую оптимизацию технологических модулей комплекса высокоэффективной обработки;
- компоновку гибкого производственного модуля комбинированной обработки;
- синтез мехатронной системы высокоэффективной комбинированной обработки.

Реализация перечисленных этапов позволила создать технологический комплекс комбинированной электромагнитной и термомеханической обработки для упрочнения изделий машиностроения, позволивший повысить производительность восстановления деталей в 3 - 4 раза [5,7, 15].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бусленко Н.П. Математическое моделирование производственных процессов. - М.: Наука, 1964. - 314 с.
2. Аргоболевский И.И., Ильинский Д.Я. Основы синтеза машин автоматического действия. - М.: Наука, 1983. - 280 с.
3. Проектирование технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий на основе многофакторной оптимизации / П.И. Яцерицын, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфец, Б.П. Чемисов // Доклады АН Беларуси. - 1997. - Т. 41, № 3. - С. 121 - 127.
4. Хейфец М.Л., Кожуро Л.М., Мрочек Ж.А. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. - Гомель: ИММС НАНБ, 1999. - 276 с.
5. Интеллектуальное производство: состояние и перспективы развития / Под общ. ред. М.Л. Хейфеца и Б.П. Чемисова. - Новополоцк: ПГУ, 2002. - 268 с.
6. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко и др. - М.: Машиностроение, 2003. - 304 с.
7. Яцерицын П.И., Кожуро Л.М., Хейфец М.Л. Гибкий производственный модуль для комбинированной электромагнитной и термомеханической обработки изделий // Вестник машиностроения. - 1996. - № 3. - С. 33 - 36.
8. Анализ высокоэффективных методов обработки при проектировании технологических комплексов / Л.М. Акулович, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфец, Е.З. Зевелева // Инженерно-физический журнал. - 1999. - Т. 72, № 5. - С. 971 - 979.
9. О самоорганизации в технологическо-эксплуатационных процессах при комбинированных методах обработки металлов / П.И. Яцерицын, Л.М. Кожуро, И.А. Сенчило, М.Л. Хейфец // Доклады АН Беларуси. - 1995. - Т. 39, № 1. - С. 112 - 116.
10. Хейфец М.Л. Цикличность состояний и свойств поверхностного слоя при комбинированных методах обработки металлов // Доклады АН Беларуси. - 1996. - Т. 40, Ха 5. - С. 120 - 123.
11. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П.И. Яцерицын, В.И. Аверченков, М.Л. Хейфец, С.В. Кухта // Доклады НАН Беларуси. - 2001. - Т. 45, № 4. - С. 106 - 109.
12. Управление термодинамическими воздействиями при электромагнитной наплавке с поверхностным пластическим деформированием / П.И. Яцерицын, Л.М. Акулович, А.П. Ракомсин и др. // Доклады НАН Беларуси. - 2000. - Т. 44, № 2. - С. 118 - 121.
13. Структурный синтез при проектировании технологических комплексов / Л.М. Акулович, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфец, Е.З. Зевелева // Инженерно-физический журнал. - 2000. - Т. 73, № 4. - С. 813 - 818.
14. Совершенствование производственных систем на основе создания условий для самоорганизации технологических процессов и объектов / П.И. Яцерицын, А.А. Шипко, М.Л. Хейфец, Н.Н. Попок // Доклады АН Беларуси. - 1996. - Т. 40, № 1. - С. 118 - 121.
15. Проектирование технологических комплексов высокоэффективной электромагнитной и термомеханической обработки / Л.М. Акулович, Л.М. Кожуро, М.Л. Хейфец, Е.З. Зевелева // Инженерно-физический журнал. - 2000. - Т. 73, № 5. - С. 1080 - 1087.