

УДК 621.9.047

В. А. Полетаев, И. С. Сыркин

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Согласно теории управления в общем случае технологический процесс (ТП), технологическая операция (ТО) представляются в виде многомерного объекта (рис. 1).

На входе объекта действует векторная переменная $X(t)$ с соответствующими $x_1(t), \dots, x_n(t)$. К этим переменным относятся все свойства заготовки (химический состав, физико-механические свойства, размеры, структура материала, стоимость и др.).

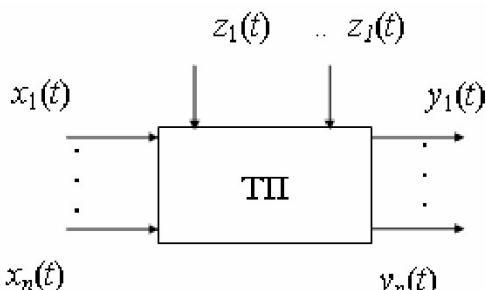


Рис. 1. Схема многомерного ТП

Параметры, характеризующие условия протекания ТП, соответствуют векторной функции $Z(t)$ с соответствующими $z_1(t), \dots, z_i(t)$. К этим переменным относятся характеристики состояния ТП: скорость резания, подача, частота вращения шпинделя, мощность, действующие нагрузки, температурный режим, упругие перемещения, интенсивность изнашивания инструмента, уровень вибраций, характеристика стружкообразования и др.

Часть составляющих векторов $X(t)$ и $Z(t)$ могут быть управляющими и составлять вектор управления $u(t)$: скорость резания, подача, жесткость, размер статической настройки и др.

Выходные переменные описываются вектором $Y(t) = [y_1(t), \dots, y_m(t)]$. К ним относятся характеристики готового изделия: химический состав, размеры, количество, шероховатость поверхности, стоимость и др. Следует отметить, что размер-

ность векторов $X(t)$, $Y(t)$ и $Z(t)$ для реальных процессов очень велика, поэтому учитываются только часть составляющих при контроле и управлении ТП. Так как вектор $Y(t)$ рассматривается как следствие осуществления ТП, составляющие векторов $X(t)$ и $Z(t)$ могут рассматриваться как причины, поэтому в общем случае переменные $X(t)$ и $Z(t)$ обычно объединяются в группу входных переменных под общим обозначением $X(t)$. Такое представление ТП дает возможность рассматривать его как объект, систему преобразования случайных функций $X(t)$ в случайные функции $Y(t)$. Неучтенные (неизмеряемые) входные переменные относятся к неконтролируемым возмущениям (шумам) $F(t)$ с соответствующими $f_1(t), \dots, f_l(t)$. Задача СУ состоит в компенсации этих возмущений.

Из сказанного очевидно, что ТП могут быть отнесены к системам с неполной случайной информацией.

Приведенное представление ТП как функционального преобразователя дает возможность применять известные методы математического описания объекта. В качестве общей динамической характеристики ТП принимается оператор, ставящий в соответствие входные и выходные функции

$$y_i(t) = A_i \{x_i(t), \dots, x_n(t)\}, i = 1 \div m. \quad (1)$$

Конкретное выражение оператора зависит от выбранной модели, которая определяется в основном решаемой задачей. В зависимости от способа представления оператора и входных и выходных переменных обычно производится классификация объектов. В общем случае ТП относится к классу стохастических объектов; оператор ТП, как и его входные и выходные переменные, является в общем случае стохастическим. Все остальные случаи носят частный характер.

Дифференциация ТП с целью их максимальной специализации дала возможность значительно повысить производительность и создала благоприятные условия для автоматизации ТП. В этом

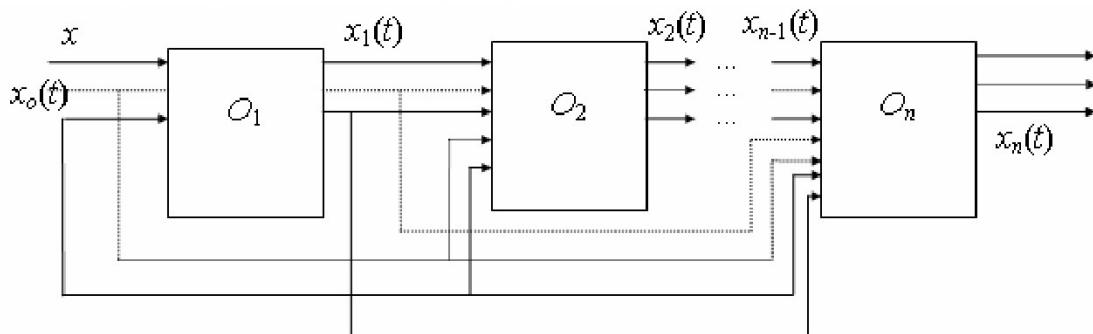


Рис. 2. Блок-схема ТП, состоящего из n последовательно соединенных объектов (операций)

случае ТП состоит из n -многомерных технологических объектов (рис. 2). На рисунке рассмотрен общий случай, когда выходные переменные ТП зависят от входных переменных каждого из объектов; все остальные случаи носят частный характер.

Любой процесс управления технологическим объектом включает реализацию следующих элементов:

- 1) получение информации о состоянии ТО путем измерения выхода переменной и определении требований, предъявляемых к ее значениям;
- 2) обработка информации о состоянии выходной переменной и сравнение полученного результата с заданным;
- 3) принятие решений об изменении состояния ТО и выработка законов управления;
- 4) отработка исполнительными органами воздействия на ТО в соответствии с выработанным законом управления.

Обычно все элементы процесса управления реализуются блоком управления (БУ) (рис. 3).

Основным принципом управления широким классом ТП механообработки является принцип обратной связи. Причинно-следственная связь между входной и выходной функциями для объекта управления устанавливается оператором A_t : $y(t) = A_t x(t)$ (рис. 3). В блоке управления реализуется обратный оператор \bar{A}_t : $x(t) = \bar{A}_t y(t)$, так как здесь $y(t)$ выступает в роли причины, а $x(t)$ – в роли следствия. Реализация по принципу обратной связи может осуществляться в системах управления по отклонению.

Для другого, так же широкого класса ТП изготовления изделий машиностроения используется

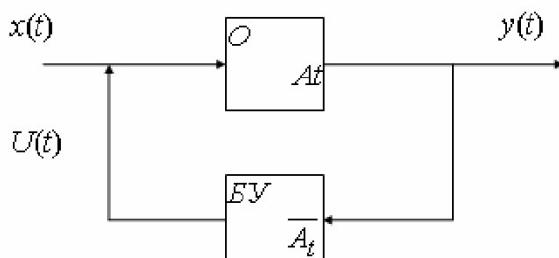


Рис. 3. Блок-схема системы управления

принцип разомкнутого управления. Его реализация осуществляется в системах управления по возмущению и в системах программного управления. Используется в случаях, когда информация о выходной переменной невозможна или невозможна ее своевременная обработка и априори выбранный закон управления обеспечивает получение заданной выходной переменной.

Для сложных процессов при недостаточной априорной информации принцип программного управления (ПУ) полностью не обеспечивает получение заданных выходных переменных, используется комбинированный управления: когда полученный по программе закон управления корректи-

руется по состоянию ТП.

В настоящее время используется множество моделей управления ТП, каждая из которых устанавливает закономерности, присущие тем или другим особенностям этих процессов. Развитие науки шло в соответствии с системными принципами. Сначала была осуществлена декомпозиция общей неизвестной модели ТП, в результате чего появилось обширное семейство моделей, каждая из которых соответствует различным задачам. Однако во многих случаях еще не осуществлено агрегатирование моделей и объединяющим началом являются количественные модели, построенные на адекватном математическом аппарате. Наиболее распространенным в технологии машиностроения является класс линейных моделей, в которых выполняется принцип суперпозиции

$$A \sum_{i=1}^n K_i x_i(t) = \sum_{i=1}^n K_i A x_i(t) \quad (2)$$

для любых K_i и $x_i(t)$, $i = 1 \dots n$.

Разновидности линейных моделей: детерминированные и стохастические, стационарные и нестационарные. Широкое распространение этого класса моделей можно объяснить их относительной простотой и хорошо разработанными методами решения.

Процесс электроэрозионной обработки (ЭЭО) довольно подробно изучен, выявлены влияния различных технологических режимов обработки на точность, шероховатость обрабатываемых поверхностей, износ электрода-инструмента (ЭИ) и производительность ЭЭО [1, 2]. Однако разработка и управление ходом технологического процесса ЭЭО до сих пор недостаточно formalизованы ввиду сложности взаимосвязей технологических параметров и выходных величин [3].

При обработке сложнопрофильных полостей ТП в общем случае состоит из следующих технологических операций (переходов): предварительная, получистовая и окончательная обработка.

Цель предварительной обработки – удаление основной части припуска за минимальное время при ограничениях, накладываемых износом инструмента.

Цель получистовой обработки – получение заданной точности изготовления и уменьшение высоты неровности поверхности и толщины измененного слоя после предварительной обработки в соответствии с требованиями по шероховатости поверхности, величина которой определяет длительность доводки.

Цель окончательной обработки – получение заданной шероховатости поверхности за минимальное время.

Таким образом, САУ процессом ЭЭО должна менять целевую функцию управления при переходе с одной операции на другую, а следовательно и конкретную структуру системы.

Исследование процесса ЭЭО [4, 7] показало,

что для управления ходом ТП необходимо использовать несколько каналов управления: генератором импульсов 2; системой прокачки рабочей жидкости 3 и сервоприводом 1 (рис. 4).

Управление сервоприводом, генератором импульсов и системой прокачки осуществляется посредством микропроцессоров 5, 6 и 7.

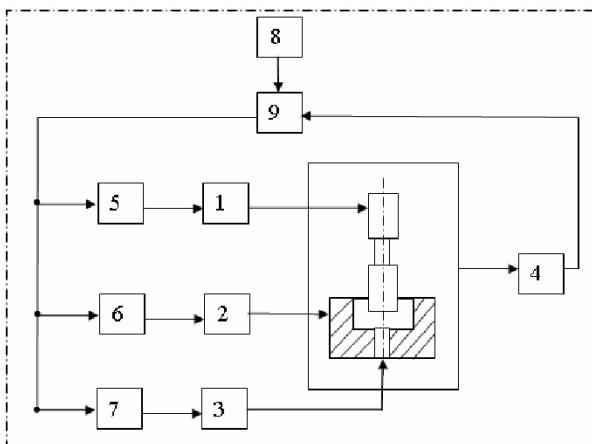


Рис. 4. Структурная схема адаптивной системы управления электроэррозионным станком

Адаптивное управление процессом ЭЭО осуществляется микропроцессором 9. Оптимальные режимы обработки в зависимости от требуемых технологических характеристик, рассчитанные в "Автоматическом технологе" 5, являются исходными при адаптивном управлении.

Критерий оптимальности зависит от целевой функции управления процессом ЭЭО, а следовательно, и от вида технологической операции ЭЭО. Например, для предварительной обработки критерием оптимальности может являться производительность обработки.

Состояние ЭЭО определяется по анализатору 4. Измеряемыми величинами являются: разрядное напряжение u_s , время задержки пробоев (ВЗП), эффективность η использования импульсов.

Регулируемые параметры: время t_0 паузы между импульсами, величина эрозионного промежутка (ЭП) или координата ЭИ, расход жидкости.

На вход главного микропроцессора 9 поступают измеряемые величины, на выход – координата ЭИ (пропорциональная величине ЭП), для микропроцессора 5, значения t_i , t_0 , u_i и i_e для микропроцессора 6, управляющего генератором 2, и значение расхода жидкости для микропроцессора 7, управляющего системой прокачки 3.

Расчет оптимальных режимов обработки осуществляется в микропроцессоре "Автоматический технолог" 8 на основе достижения максимальной производительности обработки при соблюдении заданных технических требований на деталь.

Задача оптимизации технологического процесса состоит в определении структуры и параметров обработки, при которых общее время обработки $T_{общ}$ примет минимальное значение:

$$T_{общ} = \min \left\{ \sum_{i=1}^N N_i \Delta_i A_i / V_{\omega i} \right\}. \quad (3)$$

С учетом времени разведения электродов при релаксации электродов при релаксации

$$T_{общ} = \min \left\{ N_i \Delta_i A_i \left(1 + \frac{t_{01}}{t_{p1}} \right) / V_{\omega i} \right\}, \quad (4)$$

где $\Delta_i = \Delta_i(x_i, u_i)$; $V_{\omega i} = V_{\omega i}(x_i, u_i)$

при условиях

$$x_i = f(x_i, u_i, t_i); \quad (5)$$

$$x_i(t) = x_i, u_i(t) = u_i, i = \overline{1, N}; \quad (6)$$

где N_i – число режимов обработки (переходов); A_i – площадь обработки на i -ом режиме (переходе); Δ_i – припуск, снимаемый на i -ом режиме (переходе); $V_{\omega i}$ – скорость съема припуска на i -ом режиме; t_{01} – время разведения электродов при релаксации; t_{p1} – время работы между двумя последовательными разведениями; x_i – множество допустимых значений вектора $x_i(t)$; $x_i(t)$ – фазовый вектор технологических параметров, определяющих состояние операции (перехода) в момент времени t ; u_i – множество допустимых значений вектора t ; $u_i(t)$ – вектор управления, компонентами которого являются технологические параметры i -го перехода.

К фазовым технологическим параметрам относятся показатели качества детали. К управляющим – режимы обработки, припуск на обработку.

Математическая модель технологической операции представлена системой уравнений связи (5) и ограничений (6).

В общем случае накладываются ограничения по качеству продукции, себестоимости обработки и другим показателям.

Определение численных значений технологических параметров, при которых целевая функция принимает минимальное значение и составляет суть задачи параметрической оптимизации технологической операции.

Автоматические системы электроэррозионных станков работают, как правило, при непрерывно изменяющихся сигналах управления и возмущения, поэтому для анализа используют аппарат дифференциальных уравнений.

На основе проведенных исследований [3, 4] разработана общая функциональная схема САУ электроэррозионным станком (рис. 5). Из-за неустойчивости ОУ были использованы замкнутые системы управления.

Основная трудность разработки САУ электроэррозионными станками заключается в непредвиденных изменениях в широких пределах характеристик внешних воздействий и свойств управляемых объектов, а также в неполноте информации как о свойстве объектов управления, так и внеш-

них воздействиях. Поэтому САУ и придают свойства адаптивности. Адаптивное управление позволяет на основе полученной от процесса ЭЭО информации о его параметрах находить и поддерживать для конкретных условий обработки оптимальный или заданный режим работы.

При проектировании адаптивной системы решаются две основные задачи: синтез алгоритма управления и его техническая реализация.

Алгоритм адаптивных систем управления электроэрозионными станками состоит из частных алгоритмов: выбора оптимальной модели или первичной оптимизации; определения параметров внешних воздействий; настройки параметров оптимальной модели по параметрам внешних воздействий; идентификации объектов управления; настройки параметров корректирующих воздействий по параметрам оптимальной модели и объекта управления; переработки корректирующим сигналом основного контура управления; самонастройки по замкнутому циклу, или второй оптимизации, включающей определение вычислительной ошибки цепей самонастройки и выбор управляющих элементов.

Решение задачи синтеза адаптивной системы управления электроэрозионным станком имеет следующие этапы.

1. Формулирование критерия первичной оптимизации на основе изучения конечной цели адаптивного управления. Управление, как правило, требует оптимизации системы относительно внешних воздействий. Критерий первичной оптимизации в этом случае является зависимым от переменных системы (станка), характеризующих качество ее работы.

Критерием первичной оптимизации системы по внешним воздействиям может быть условие

максимума быстродействия, максимума производительности ЭЭО, максимума точности изготовления детали и т.д. Такие критерии первичной оптимизации используются для систем АУ по внешним воздействиям и по динамическим характеристикам объекта управления (электроэрозионного станка). Для последнего типа систем АУ применяется такой критерий, как условие стабильности динамических свойств системы, которое может сводиться к минимизации среднеквадратического отклонения выходной координаты системы от выходной координаты ее модели.

2. Описание входного сигнала, который представляет собой полезный сигнал или его комбинацию с сигналом помехи, например рабочий ток и ток короткого замыкания или радиочастотные колебания квазидугового напряжения разрядов между электродами и импульсы напряжения холостого хода на ЭП. Полезный сигнал и помеха могут быть как детерминированными, так и случайными функциями времени.

3. Задание идеального преобразования, которое должно осуществляться САУ.

4. Формулирование сведений о структуре САУ. САУ может быть заданной (определеню подлежат лишь параметры), частично заданной или неизвестной (определению подлежат структура и параметры).

5. Формулирование ограничений на переменные параметры системы, в том числе дополнительных условий связи, используемых при решении вариационной задачи.

6. Определение класса системы, в котором производится синтез системы АУ. Его выбор определяется большим числом факторов: критерием первичной оптимизации (например, получение высокого качества обработанной поверхности без

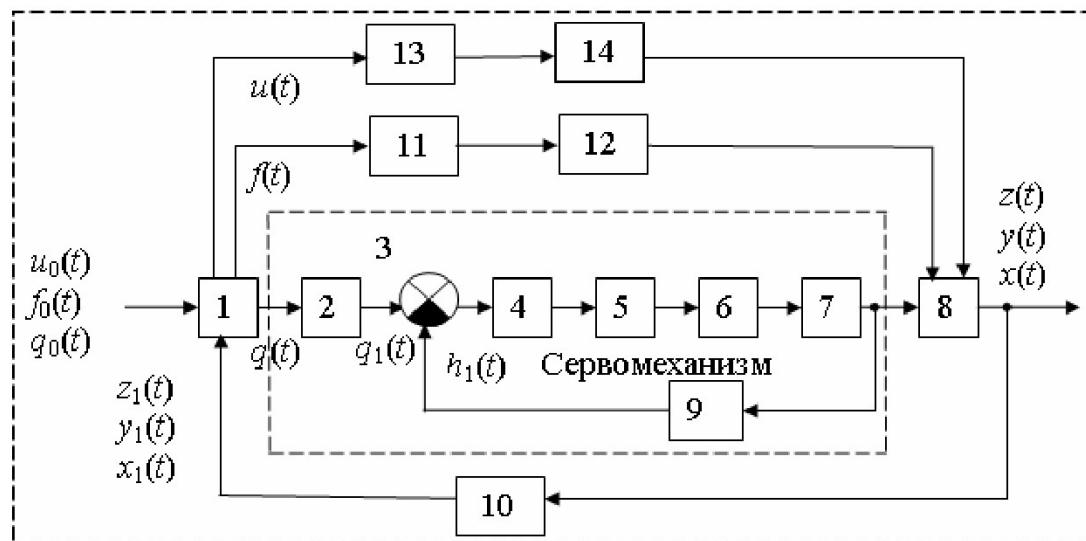


Рис. 5. Функциональная схема САУ:

1 – задающее устройство; 2, 11, 13 – преобразовательные устройства;
3 – суммирующее устройство; 4 – усилитель; 5 – регулятор; 6 – исполнительное устройство; 7 – тяговое устройство; 8 – объект управления; 9 – измерительное устройство; 10 – анализатор; 12 – управляющее устройство генератора импульсов; 14 – управляющее устройство системы прокачки рабочей жидкости

учета времени обработки), видом ограничений (например, получение высокого качества обработанной поверхности за заданное время обработки), имеющимися средствами технической реализации и т.д. Если критерий первичной оптимизации состоит в обеспечении экстремума показателя цели управления в каждый момент времени, то синтез проводится в классе систем АУ с переменными параметрами; в случае интегрального критерия – в классе систем с постоянными или кусочно-постоянными параметрами; если быстродействие ЭВМ ограничено, так что она может вырабатывать уставки параметров непрерывной системы управления через значительные интервалы времени, – в классе систем АУ с кусочно-постоянными параметрами и т.д.

По способу реализации отклонения критерия от его оптимального значения в алгоритме управления эти системы могут быть исполнены с непрерывной и дискретной отработкой алгоритма управления; в экстремальном варианте; в виде следящего привода.

Назначение экстремальной системы регулирования (например, межэлектродного зазора) – находить регулирующие воздействия, соответствующие оптимальным значениям показателя качества, и поддерживать этот режим при изменении внешних возмущений, влияющих на положение экстремума. Экстремальную задачу можно решить, используя либо принцип управления по возмущению, либо принцип управления с обратной связью по показателю качества.

Для того чтобы создать систему по второму принципу, достаточно лишь знать о существовании экстремальной характеристики объекта. Обратная связь по показателю качества позволяет компенсировать в той или иной степени все возмущения, действующие на объект управления. Характерной особенностью экстремальных систем управления является наличие поисковых движений, с помощью которых определяется положение рабочей точки относительно экстремума и выбирается направление изменения регулирующих воздействий.

Для устранения поисковых колебаний и низкой помехоустойчивости применяют дифференциальные системы экстремального управления без поисковых колебаний, на основе, например, принципа сдвига характеристик.

Процесс самонастройки системы управления обычно состоит из двух основных этапов:

1) определения какой-либо характеристики процесса, достаточно полно отражающей его текущее состояние;

2) определения и реализации необходимых воздействий на систему в целях обеспечения в новых условиях требуемого качества ее работы.

Поэтому организация самонастройки требует информации о течении управляемого процесса, о действующих на систему внешних возмущениях и

т.п.

Как было показано выше, конкретная структура САУ и ее параметры зависят от целевой функции управления конкретным технологическим процессом ЭЭО. В качестве примера рассмотрим получистовую обработку сложнопрофильных полостей деталей.

Для выбора критерия управления процессом рассмотрим систему уравнения (8), представляющую собой статическую модель процесса ЭЭО [4, 10].

$$\begin{aligned} \Pi &= K_1 N_p I_u t_u; \\ \frac{I_u t_u N_p v_3}{S_u T} &< q_{kp}; \\ R_z &= K_2 I_u^\alpha t_u^\beta; \\ \gamma &= t_u^{0,15} (K_3 + K_4 \ell n I_u + K_5 \ell n t_u); \\ \gamma_1 &= K_{\gamma 1} t_u^{-1,5} I_u^{1,1} \text{ для } t_u > K_{\gamma 1} I_u^{0,6}; \\ \gamma_2 &= K_{\gamma 2} t_u^{-0,1} I_u^{0,2} \text{ для } t_u > K_{\gamma 2} I_u^{0,6}. \end{aligned} \quad (7)$$

где Π – производительность процесса ЭЭО; K_1 – коэффициент, характеризующий съем материала на единицу электричества и учитывающий эрозионную стойкость материала электрода-заготовки; N_p – число рабочих импульсов тока в единицу времени; I_u – амплитуда импульса тока; t_u – длительность импульсов тока; v_3 – приэлектродные падения напряжения, характерные для конкретной пары электродов; S_u – площадь рабочей поверхности электродов; q_{kp} – плотность теплового потока, соответствующая тепловому кризису 2-го рода; коэффициент K_2 и показатели степени α и β учитывают кроме объема единичных лунок, их глубину и степень взаимного наложения; K_3, K_4, K_5 – коэффициенты, определяемые экспериментальным путем; $K_{\gamma 1}, K_{\gamma 2}$ – постоянные, определяемые экспериментально.

Из анализа системы (7) можно сделать вывод, что оптимизация какого-либо технологического показателя процесса несомненно повлечет за собой изменение остальных из-за наличия общих режимных параметров.

С технологической точки зрения основными критериями качества процесса ЭЭО являются точность обработки, шероховатость поверхности и производительность. Поэтому целевая функция управления в общем виде может формулироваться как достижение минимального износа ЭИ при обеспечении заданных значений шероховатости и производительности.

Требуемая шероховатость поверхности, обрабатываемой на окончательных переходах, обеспечивается соответствующим выбором значений управляющих и режимных параметров, таких как частота следования, длительность и амплитуда импульсов тока [1, 2]. Указанные параметры в

процессе окончательной обработки поддерживаются на уровне и, таким образом, не могут использоваться для управления величинами износа ЭИ и производительности.

Поддержание производительности обработки на заданном уровне, согласно (7) может осуществляться регулированием средней мощности импульсов, подводимых от ГИ к МЭП.

Таким образом, задача минимизации величины износа ЭИ в процессе ЭЭО, с учетом ограничений на остальные технологические показатели, обуславливает поиск нового режимного параметра, оказывающего наибольшее влияние на износ ЭИ.

Представленные зависимости (7) связывают $\gamma_{\text{ЭИ}}$ с амплитудой I_u и длительностью t_u импульса тока. В тоже время износ ЭИ зависит от формы переднего фронта импульсов тока, характеризуемой коэффициентом η_ϕ .

В результате проведенных исследований выявлена экстремальная зависимость $\gamma_{\text{ЭИ}} = f(\eta_\phi)$, на основании которой для широкого класса технологических схем ТП ЭЭО, с целью снижения износа и повышения производительности обработки возможно гибкое энергетическое воздействие на МЭП. [4, 10]

Для разработки алгоритма управления, с целью оптимизации износа ЭИ, необходимо получить математическое описание объекта управления (ОУ), связывающее режимные параметры процесса с выходным технологическим показателем

$$\gamma_{\text{ЭИ}} = f(I_u, t_u, \eta_\phi). \quad (8)$$

Такая зависимость получена на основе регрессионного анализа [4]

$$\gamma_{\text{ЭИ}} = B_0 + B_1 I_u - B_2 t_u - B_3 \eta_\phi + B_4 \eta_\phi^2 - B_5 I_u t_u. \quad (9)$$

Математическая модель формирования режимных параметров ОУ может быть представлена системой уравнений (10) [4, 10]:

$$\begin{aligned} P &= \int_{T_0}^{t_u} \sum_{j=0}^N \int_{t_j}^{t_j+t_u} u_j i_j dt; \\ N &= f \cdot T_0 \left(1 - e^{-k_1 t_u / (1-k)} \right); \\ dk/dt &= k_2 p (k_3 - k_5 k \Delta / k_4 \mu); \\ u_u &= i(r_0 + r) + L(d_i/dt + u_p); \\ u_j &= k_6 i_j \delta \sqrt{\int_{t_j}^{t_j+t_u} i_j^2 dt}; \\ d\Delta/dt &= K_3 P / \delta_n - V_n. \end{aligned} \quad (10)$$

где N – число пробоев МЭП за период времени T_0 ;

t_j – момент времени наступления пробоя МЭП; i_j и i_j – напряжение и ток разряда в течение j -го пробоя МЭП; n – число импульсов напряжения, подаваемого на МЭП за период времени T_0 ; P – вероятность наступления пробоя МЭП; f – частота следования импульсов напряжения; μ – кинематическая вязкость.

Для исследования математической модели формирования режимных параметров процесса ЭЭО составлена структурная схема моделирования нелинейного объекта управления, представленного системой уравнений (10) и программы моделирования [4].

Практическая реализация эксперимента на объекте управления проводилась с использованием экспериментальной установки [4].

В результате моделирования ОУ и проведения практического эксперимента получено семейство статистических и динамических характеристик средней мощности импульсов $\bar{P} = f(v_n)$; $\bar{P} = f(u_n)$ и амплитуды тока $J = f(v_n)$; $J = f(u_n)$; $\bar{P} = f(t)$; $J = f(t)$; напряжения источника питания $u_u = f(t)$; скорости подачи инструмента $v_u = f(t)$ [4, 10].

На основании полученных результатов произведен вывод передаточных функций объекта управления по каналам управления.

Для канала "скорость подачи – средняя мощность" ОУ

$$W(s) = \frac{K}{T_2^2 S + T_1 S + 1}, \quad (11)$$

$$\text{где } K = \frac{S_u}{K_7}; \quad T_2 = \left(\frac{S_u}{K_2 A_u K_1 K P^o K_4^o \delta^{o2} K_7} \right)^{1/2}; \\ T_3 = \frac{S_u [K P^o \delta^{o3} + K J A_u (K K^o \delta^{o3} - K_3)]}{K_2 A_u K_J K P^o K^o \delta^{o2} K_7}.$$

Для канала управления током в импульсе

$$W(s) = \frac{K(\bar{s} + 1)}{(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)}, \quad (12)$$

$$\text{где } K = (1 - \delta K_1) / R; \quad \bar{s} = \frac{\bar{\tau}_p - \delta (\bar{\tau}_p K_1 - K_2)}{1 - \delta K_1};$$

$$T_1 = \bar{\tau}_p; \quad T_2 = L/R.$$

Для рассматриваемой системы оптимизирующими показателем выбрана величина износа ЭИ ($\gamma_{\text{ЭИ}}$). Характеристика объекта $\gamma_{\text{ЭИ}} = f(t_u I_u \eta_\phi)$, как показано выше имеет ярко выраженный экстремальный характер. Однако введенные ограничения на другие показатели процесса (производительность и качество поверхности) продолжают поддержание постоянных режимных параметров: величины амплитуды I_u и длительности t_u импульсов тока, так как производительность обработки определяется из выражения

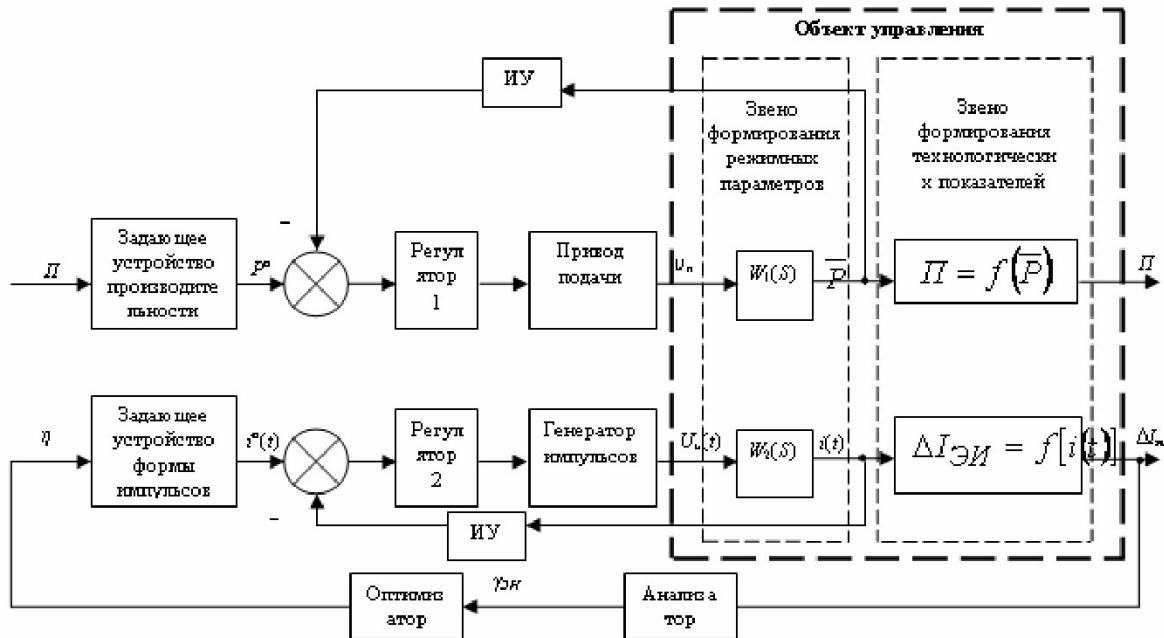


Рис. 6. Функциональная схема экстремальной САУ процессом ЭЭО

$$\Pi = KP - kN_p \int_0^{t_u} u_i at \left| \begin{array}{l} I_u = \text{const} \\ t_u = \text{const} \end{array} \right. \quad (13)$$

Таким образом, многоэкстремальный ОУ приводится к одноэкстремальному. Если измерение $\gamma_{\text{ЭИ}}$ производится в дискретные моменты времени, то данную САУ можно отнести к классу дискретных.

Ввиду отсутствия зависимости коэффициентов регрессии в уравнении $\gamma_{\text{ЭИ}} = f(t_u, I_u, \eta_\phi)$ от режимов обработки, а также вследствие изменения условий в процессе обработки точное математическое описание ОУ отсутствует. Поэтому в разрабатываемую САУ необходимо ввести регулятор-оптимизатор.

Так как рассматриваемый объект относится к классу дискретных, следовательно, управление параметрами можно дискретизировать во времени, то есть использовать шаговые алгоритмы поиска экстремума.

Проведенный анализ существующих поисковых алгоритмов [1] показывает возможность использования алгоритма с совмещенными пробами и рабочими шагами, характеризующегося минимальными затратами времени на входжение системы в зону экстремума показателя $\gamma_{\text{ЭИ}}$.

Для уменьшения времени на "рыскание" в зоне экстремума в САУ можно использовать алгоритм адаптации рабочего шага и времени выдержки в соответствии с выражениями:

$$t_b(i+1)$$

$$\begin{aligned} & t_b(\max), \text{ если } \Delta x_{i-1} x_i \leq 0 \\ & t_b(\min), \text{ если } \Delta x_{i-1} x_i > 0 ; \end{aligned} \quad (14)$$

$$a_u(i+1) = a_u(i)^{(i+\nu \Delta x_{i-1} \Delta x_i)}, \quad (15)$$

где $0 < \nu < 1$.

ОУ представлен в виде последовательного соединения двух звеньев. Режимные параметры – средняя мощность и коэффициент формы переднего фронта импульсов тока, являются управляющими параметрами системы. Средняя мощность импульсов в процессе обработки поддерживается постоянной, а изменение коэффициента формы переднего фронта импульсов тока формирует экстремальную характеристику второго звена

$$\gamma_{\text{ЭИ}} = B_0 + B_1 J_u + B_2 t_u + B_3 \eta_\phi + B_4 \eta_\phi^2 .$$

Величина $\gamma_{\text{ЭИ}}$ при фиксированных значениях J_u , t_u и η является функцией коэффициентов B_0 , B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , которые, в свою очередь, зависят от переменных условий обработки, то есть являются случайными функциями времени. Таким образом, экстремум $\gamma_{\text{ЭИ}}$ в процессе обработки "дрейфует" в соответствии с изменяющимися условиями. Поиск экстремума $\gamma_{\text{ЭИ}}$ осуществляется оптимизатором, на ходе которого формируется ступенчатая последовательность сигнала по каналу управления коэффициентом формы переднего фронта импульса тока. Данный сигнал и сигнал соответствующий средней мощности, являются задающими для САУ. Функциональная схема САУ процессом ЭЭО приведена на рис. 6.

Задачей управления средней мощности, подводимой к МЭП, является стабилизация параметра

\bar{P} на заданном уровне, с требуемой точностью и быстродействием. Возмущающими воздействиями здесь являются дисперсия числа пробоев МЭП и изменение энергии импульсов тока. Синтез параметров передаточной функции регулятора производился методом логарифмических частотных характеристик [4]. Исследование позволило определить передаточную функцию корректирующего звена:

$$P(s) = \frac{(\hat{\tau}_1 s + 1)(\hat{\tau}_2 s + 1)}{S(T_3 s + 1)}. \quad (16)$$

Задачей канала управления формой импульсов является формирование кривой переднего фронта импульсов тока, с требуемой динамической точностью. Возмущающим воздействием для данного канала является изменение в работе величины межэлектродного зазора δ .

Передаточная функция неизменной части системы, включающей в себя ОУ и ГИ:

$$W(s) = W_{GI}(s)W_0(s) = \frac{K_{GI} K_0}{(T_0 s + 1)(T_{GI} s + 1)}. \quad (17)$$

Синтез регулятора позволил определить передаточную функцию корректирующего звена [4]:

$$P(s) = \frac{K(\hat{\tau}_1 s + 1)(\hat{\tau}_3 s + 1)(\hat{\tau}_4 s + 1)}{S(\hat{\tau}_2 s + 1)(\hat{\tau}_5 s + 1)}. \quad (18)$$

Разработанная САУ обладает астатизмом 1-го порядка по отношению как к задающим, так и возмущающим воздействиям, что обусловлено включением интегрирующих звеньев, входящих в регулятор, до места приложения возмущений. Среди них – случайная составляющая числа разрядных импульсов, случайные ступенчатые изменения величины межэлектродного зазора δ и площади обрабатываемой поверхности S_n . Для канала стабилизации средней мощности, возмущающим воздействием является также изменение энергии разрядных импульсов, происходящие в результате поисковых движений САУ в качестве управления кривой переднего фронта импульсов тока.

С целью технической реализации алгоритма управления проведены исследования по выбору и разработке элементов САУ [4-6, 8, 9].

Задача поддержания межэлектродного зазора разбивается на две подзадачи. Первая подзадача – обеспечить необходимое положение электродоинструмента в любой момент времени. Для решения этой подзадачи требуется разработать контроллер линейного двигателя, основной задачей которого будет регулирование положения якоря двигателя. Требуемое положение якоря двигателя задается на основе анализа состояния межэлектродного зазора. Измеряя параметры рабочих импульсов – напряжение и ток, можно определить состояние процесса обработки – холостые импульсы, нормальный режим, короткое замыкание. Этим занимается другой блок, названный регулятором зазора. На основе полученных данных рассчитывается необходимое положение электрода-

инструмента. Таким образом, для решения задачи регулирования межэлектродного зазора требуется согласованное действие двух блоков системы – **контроллера двигателя и регулятора зазора**.

Исследование объекта управления и существующих регуляторов зазора показало, что управление процессом ЭЭО основанное на математических моделях, отличающихся невысокой точностью, следует использовать нечеткие регуляторы.

Для ускорения настройки параметров нечеткого регулятора требуется автоматизировать этот процесс. Одним из способов поднастройки параметров нечеткого регулятора является использование искусственных нейронных сетей. Проведенные исследования особенностей управления процессом ЭЭО позволили разработать нейронечеткий регулятор привода подачи электроэропионного станка [4, 6, 8]. Промоделирован процесс ЭЭО, который показал, что нечеткий ПИД-регулятор обладает лучшими показателями качества регулирования независимо от типов привода [4, 6].

Для реализации нейросетевых вычислений использован серийный микроконтроллер серии dsPIC производства компании Microchip. Они обладают достаточным быстродействием и содержат большой набор периферийных устройств [4, 5]. Система команд ядра dsPIC30F имеет два класса команд: микроконтроллерные инструкции и команды цифровой обработки сигналов. Оба класса команд равномерно интегрированы в архитектуру контроллера и обрабатываются одним ядром.

На основании изложенного была разработана схема регулятора МЭЗ [4]. Основой разработанного регулятора служит микроконтроллер dsPIC30F4011, на аналоговые входы которого поступают отфильтрованные сигналы с датчиков тока и напряжения. Программа микроконтроллера постоянно измеряет значения рабочего тока и напряжения и вычисляет требуемое положение электрода для достижения заданных показателей качества обработки. Вычисленное положение электрода передается в контроллер двигателя по шине 12С.

Исполнительное устройство САУ предназначено для создания регулирующего воздействия на объект управления. Оно часто является определяющим в отношении динамики, габаритных размеров и веса всего сервомеханизма.

Основные требования, предъявляемые к исполнительному устройству:

- способность развивать необходимые перестановочные усилия для перестановки регулирующих органов ОУ;
- обеспечение перестановки регулирующих органов на требуемую величину;
- обеспечение требуемых скоростей и ускорения перемещения управляющих органов;
- минимальное потребление энергии и высокий КПД;

- высокая надежность, минимальная стоимость и др.

В электроэрозионных станках нашли применение электрические двигатели и исполнительные устройства постоянного и переменного тока различных типов.

При выборе **электродвигателя** на этапе проектирования САУ следует учитывать:

- ограничения, предопределенные источником энергии, типом усилительных и преобразующих устройств;
- структуру и тип системы управления, а также требования к ее статическим (точности) и динамическим (показателям качества) характеристикам;
- энергетические характеристики электродвигателей, так как серийный двигатель того или иного типа можно использовать лишь в определенном диапазоне мощностей, скоростей и ускорений; особое значение имеет также мощность, необходимая для управления электродвигателем;
- конструкцию регулирующего органа, требования к характеру его движения, к величине перемещения и точности установки нулевого положения, а также величину и характер нагрузки;
- параметры, характеризующие внешние условия, вибрацию, температуру, давление, влажность и т.д.;
- надежность, стоимость, экономичность и к. п. д.

Привод подачи электроэрозионного станка должен обеспечить высокое быстродействие и точность перемещения от которых будет зависеть эффективность работы САУ. Несмотря на широ-

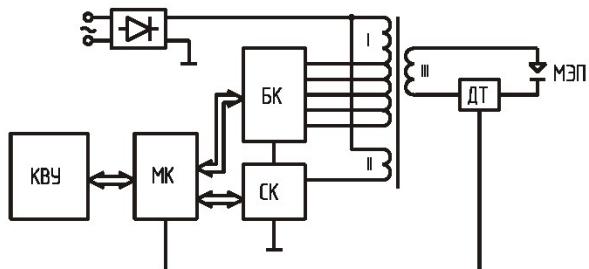


Рис. 7. Структурная схема генератора импульсов: МК – микроконтроллер, КВУ – контроллер верхнего уровня, БК – блок коммутации, СК – силовые ключи, ДТ – датчик тока, МЭП – межэлектродный промежуток

кое распространение, привод подачи, основанный на типовом органе "ходовой винт-гайка" не обеспечивает требуемых динамических характеристик: равномерности разгона и торможения, максимального ускорения, скорости перемещения и др. Для обеспечения требуемых динамических и статических характеристик использован линейный двигатель. Линейный двигатель не требует передаточных механизмов в приводе электроэрозионного станка. Имеет простую конструкцию (состоит из трех элементов: электромагнитный статор и плоский ротор, измерительная линейная с высокой дискретностью – 0,1 мкм), усилие, развиваемое якорем, зависит только от величины токов в обмотках, линейная зависимость усилия от перемещения якоря. Исследования, проведенные при моделировании САУ с различными приводами сервомеханизма, подтвердили правильность при-

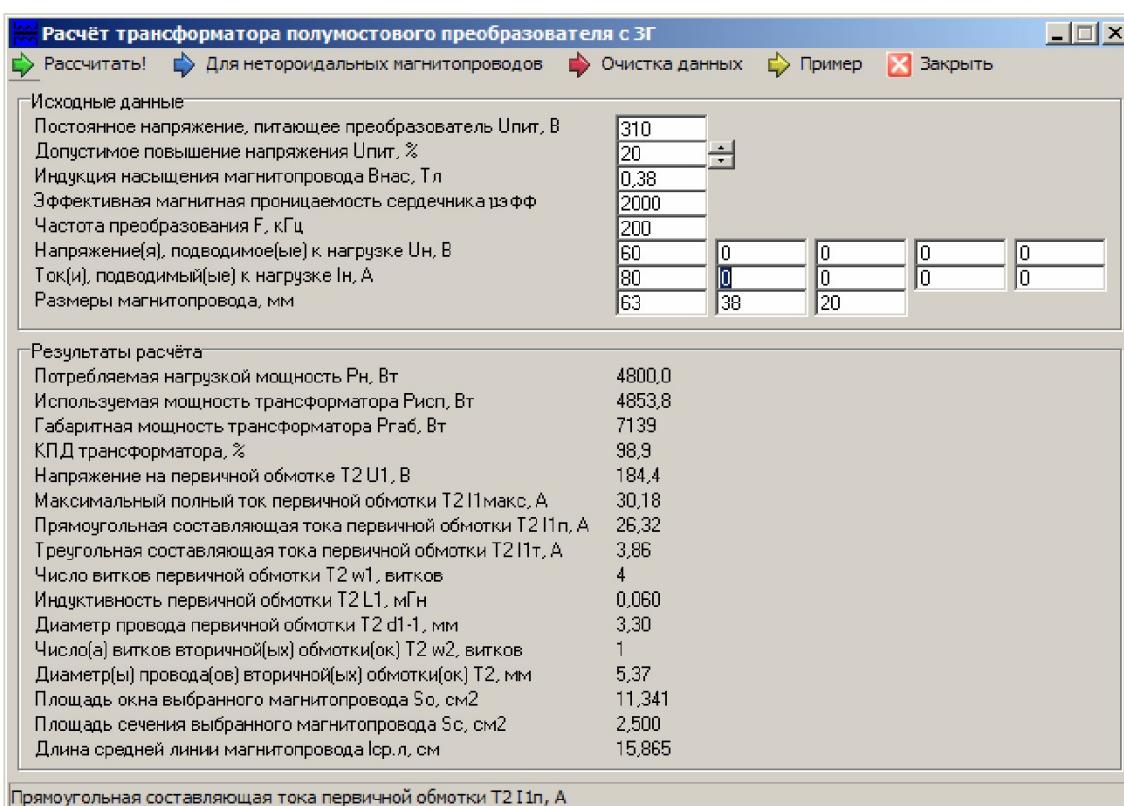


Рис. 8. Результаты расчета трансформатора

нятого решения [4, 5, 7].

Линейный двигатель обеспечивает требуемые динамические показатели: равномерность разгона, высокая скорость перемещения, большое ускорение. В качестве линейного двигателя принят линейный синхронный двигатель серии LSM-2-24-110x, который имеет следующие основные параметры: точность позиционирования до 0,1 $\mu\text{м}$; максимальная скорость до 3,6 м/с; максимальное ускорение до 8 г КПД – 68,4 %.

Генератор импульсов (ГИ) является основным каналом регулирования режимов обработки, которое осуществляется через изменение параметров единичных импульсов и времени паузы между ними или групповыми импульсами.

Требования к ГИ включают в себя необходимость получения высокого к.п.д. и, кроме того, определяются свойствами МЭП – резко нелинейного элемента электрической цепи [4].

Основная задача генератора – выработка заданной последовательности импульсов заданного напряжения и тока. При этом должен регулировать силу тока, рабочее напряжение импульсов и форму импульсов. В соответствии с функциями ГИ и требованиями к нему разработана структура ГИ (рис. 7) и проведен его расчет.

Расчет силового трансформатора произведен по программе "Transformer" [4] (рис. 8).

Разработанный **блок питания** снабжает энер-

гий привод линейного двигателя [4, 5]. Согласно паспортным данным, рабочее напряжение на двигателе составляет 40 В; максимальный ток, потребляемый якорем двигателя – 4,7 А. В начальный период разработки и отладки контроллера двигателя желательно подавать на якорь напряжение меньше номинального, чтобы в аварийном случае скорость перемещения якоря была меньше максимально допустимой для данного двигателя. После отладки контроллера рабочее напряжение можно поднять до максимально допустимого, чтобы двигатель достиг номинальных динамических характеристик. По этим соображениям были составлены требования к блоку питания;

- выходное напряжение – 30-60 В;
- максимальный длительный ток – 20 А.

Испытания [4] показали, что разработанный блок позволяет стабилизировать выходное напряжение в диапазоне 25-60 В; рабочий ток достигает величины 6А. В этом режиме существенного нагрева силовых элементов блока не наблюдалось. Вывод - блок питания соответствует предъявляемым к нему требованиям и приемлем для питания контроллера линейного двигателя.

Техническая реализация спроектированной САУ процессом электроэррозионной обработки осуществляется на базе экспериментального образца электроэррозионного станка [4, 7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иоффе В. Ф., Коренблум М. В., Шавырин В. А. Автоматизированные электроэррозионные станки. – Л.: Машиностроение, 1984. – 227 с.
2. Размерная электрическая обработка металлов/Б.А.Артамонов и др.–М.:Высш. школа, 1978. – 336 с.
3. Особенности управления процессом ЭЭО / Полетаев В. А., Сыркин И. С. // Вестник СГУПСа. – Новосибирск, 2005. – Вып. 11. – С. 56-62.
4. Конструкция системы управления электроэррозионным станком / Полетаев В.А., Сыркин И.С. // Вестн. КузГТУ. – Кемерово, 2007. – Вып. 1. – С. 54-59.
5. Разработка и управление ходом технологического процесса электроэррозионной обработки / Полетаев В. А., Сыркин И. С. // Вестн. КузГТУ. 2007. №. 1. – С. 60-66.
6. Отчет по программе "Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы) на 2006-2007 г.г." по проекту "Разработка системы управления с использованием теории нечетких множеств и нейронных сетей", код проекта 2.1.2-5232.
7. Полетаев В. А., Сыркин И. С. Адаптивная система управления процессом электроэррозионной обработки // Труды I Всероссийской научно-технической конференции "Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса". – Кемерово, 2007
8. Сыркин И. С. О выборе регулятора в системе управления электроэррозионным станком. Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. // Труды V Всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2005. – С. 310-312.
9. Сыркин И. С., Полетаев В. А Управление процессом электроэррозионной обработки // Вестник РАЕН, 2007. – Вып. 9. – С. 192-198.
10. Атрощенко В. В., Голубятников А. Г., Лахмостов А. Б., Митрофанов А. А., Полянин В. И. Повышение эффективности электроэррозионной обработки методом гибкого энергетического воздействия // Авиационная промышленность, 1989. – Вып. 10. – С. 40-43.

□ Авторы статьи:

Полетаев

Вадим Алексеевич

- докт. техн. наук, проф., зав.каф.
информационных и автоматизиро-
ванных производственных систем

Сыркин

Илья Сергеевич

- ассистент каф. информационных и
автоматизированных производст-
венных систем