

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 658.012.011.56:658.512

В. А. Полетаев, И. С. Сыркин

### РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧЕРНОВЫМ ПЕРЕХОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

В машиностроении одним из критериев эффективности обработки (деталей) изделий является производительность. Как правило, во время чернового технического перехода (операции) снимается основной припуск, благодаря чему этот переход наиболее важен с точки зрения общего времени обработки. Следовательно, для повышения эффективности электроэрозионной обработки (ЭЭО) требуется повысить скорость работы оборудования на черновом переходе, что возможно при использовании системы управления процессом.

Выбор и обоснование алгоритма управления процессом ЭЭО

Как показали исследования [1], производительность ЭЭО зависит от величины межэлектродного зазора и длительности импульса тока по экстремальным законам. При этом задача обеспечения максимальной производительности становится задачей многофакторной оптимизации. Необходимо отметить, что экстремум каждой из функций зависит не только от управляемых параметров процесса обработки, но и от параметров состояния  $\Psi(\hat{z})$  (например, загрязнения зазора продуктами эрозии). Параметры состояния носят случайный характер, что не дает возможности учета их влияния на результат обработки. Кроме того, параметры состояния невозможно измерить прямым методом, возможна лишь косвенная оценка их влияния на процесс обработки.

В связи с тем, что априорная информация об объекте управления недостаточна, характеристика объекта в процессе функционирования изменяется непредвиденным образом в широких пределах, следует использовать адаптивную систему управления.

Адаптивные системы управления включают объект, регулятор и блок адаптации (рис. 1). Объект **О** и регулятор **Р**, вырабатывающий управляющее воздействие на объект, образуют основной контур. Регулятор содержит варьируемые параметры. Блок адаптации **А** на основе обработки доступной ему информации вырабатывает управляющее воздействие, производящее подстройку варьируемых параметров регулятора. Регулятор совместно с адаптером образуют адаптивный ре-

гулятор.

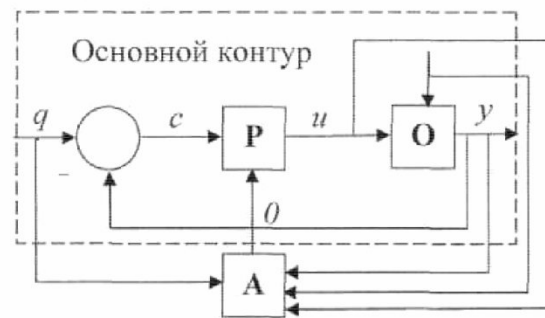


Рис. 1. Структура адаптивной системы управления

Процесс ЭЭО сложный, нелинейный [1], поэтому линейный регулятор, поддерживающий заданные выходные параметры будет неэффективным. Одним из эффективных алгоритмов управления сложными нелинейными объектами является нечеткая логика [3]. В связи с этим в качестве регулятора процесса был выбран нечеткий регулятор.

Нечеткий регулятор (рис. 2) представляет собой устройство, рассчитывающее величину входного воздействия для ОУ ( $U(t)$ ) на основе ошибки рассогласования  $\varepsilon(t) = X(t) - Y(t)$ , где  $X(t)$ ,  $Y(t)$  – входная и выходная величины системы. Для расчета используется один из методов нечеткого вывода, который состоит из фазификации входной переменной (преобразования величины  $\varepsilon(t)$  в значения функций принадлежности  $\mu_i(\varepsilon)$  нечетких множеств), принятия решения на основе базы правил решений и дефазификации (процесса нахождения значения для каждой из выходных лингвистических переменных  $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ ) [4]. Обучение нечеткого регулятора осуществляется при помощи нейронной сети ("НС" на рисунке).

Существует несколько способов настройки параметров нечеткого регулятора. Один из них предполагает наличие эксперта. В этом случае разработчик самостоятельно задает количество термов у каждой лингвистической переменной, значения функций принадлежности этих термов и правила нечеткого вывода. Подобный подход к

разработке системы требует сотрудничества специалиста в области нечеткой логики и специалиста (эксперта) в предметной области, для которой создается нечеткая система. Эксперт, используя свои знания, помогает разработчику проектировать систему. Такой подход к разработке обладает

ваемой детали – площадь поверхности  $S$ , глубину обработки  $h_0$ , материал заготовки. После получения этих данных "автоматический технолог" ищет нужную комбинацию параметров детали в БД. Если такая комбинация найдена, из базы извлекаются режимы обработки и настройки регулятора.

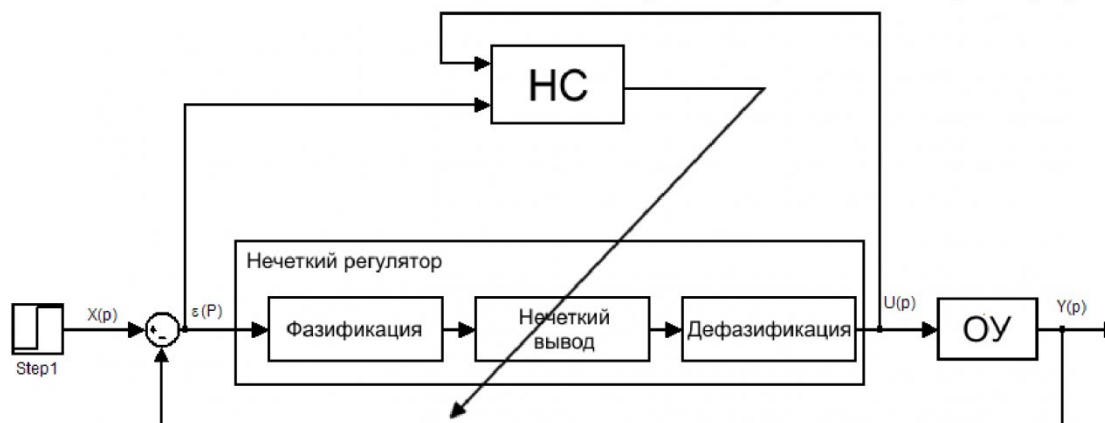


Рис. 2. Обобщенная САУ с нечетким регулятором. ОУ – объект управления

некоторыми недостатками. Один из них заключается в том, что настройка регулятора проводится всего один раз, при создании. Если объект управления нестационарный, например, процесс ЭЭО, его характеристики меняются с течением времени. При изменении характеристик объекта необходимо изменять параметры регулятора для того, чтобы обеспечивать требуемые показатели качества регулирования. Поэтому регулятор, настроенный один раз, потом не сможет управлять этим объектом или управление со временем перестанет быть эффективным. Для поддержания эффективного управления необходимо постоянно изменять параметры регулятора. Выполнить это можно несколькими способами, например, генетическими алгоритмами и нейронными сетями. При использовании генетических алгоритмов процесс настройки может быть долгим, т.к. поиск оптимальных параметров осуществляется на большой области их допустимых значений. Использование нейронных сетей позволяет проводить направленный поиск по аналогии с градиентными алгоритмами. Поэтому изменение параметров регулятора планируется выполнять при использовании нейронных сетей.

Электроэрозионная обработка разных деталей требует различных режимов обработки ( $I_{\max}$ ,  $\tau_i$ ). Для разных режимов обработки необходимы индивидуальные настройки регулятора процесса. Предварительное определение режимов обработки и настроек регулятора осуществляется автоматическим технологом (АТ). Расчет этих режимов дает неточный результат, т.к. сам процесс обработки зависит от множества случайных факторов, которые изменяются во времени.

Алгоритм функционирования СУ ЭЭО показан на рис. 3. Перед началом обработки АТ запрашивает у пользователя параметры обрабаты-

Извлеченные данные для такой детали являются исходными для дальнейшей подстройки. Когда АТ не может найти похожую деталь в БД, применяются специальные алгоритмы для расчета режимов обработки. Рассчитанные режимы так же являются исходными.

После того, как определены режимы обработки и параметры настройки регулятора, начинается сам процесс ЭЭО. В ходе процесса обработки блок обучения нейронной сети записывает входные (положение электрода-инструмента, параметры ГИ и механизма прокачки) и выходные параметры процесса (количество импульсов различных типов, время задержки искры) в свою память для последующего анализа и обучения регулятора. Обозначим вектор входных параметров как  $\Delta X$ , выходных – как  $\Delta Y$ . Для каждого момента времени сохраняется своя пара  $\Delta X - \Delta Y$ . Через равные интервалы времени  $t_i$  происходит анализ хода протекания процесса и обучение регулятора.

При анализе определяется, соответствуют ли выходные параметры  $\Delta Y$  в каждый момент времени целевой функции. Сравнивая производительность за предыдущий и текущий временные интервалы, можно определить, изменилась ли скорость обработки. Если скорость не соответствует заданной, требуется корректировка параметров регулятора. Для этого проводится обучение нейро-нечеткой сети.

Процесс обучения нейро-нечеткой сети – самый сложный этап работы системы. Известно, что существует обучение нейронных сетей с учителем и без. В данной работе применяется обучение с учителем, что требует создания обучающих выборок – наборов комбинаций входных ( $\mu_p$ ,  $\mu_x$ ,  $\mu_k$  и первых производных этих величин по времени) и выходных переменных ( $\delta x$ ,  $\tau_i$ ,  $I_{\max}$ ), соответст-



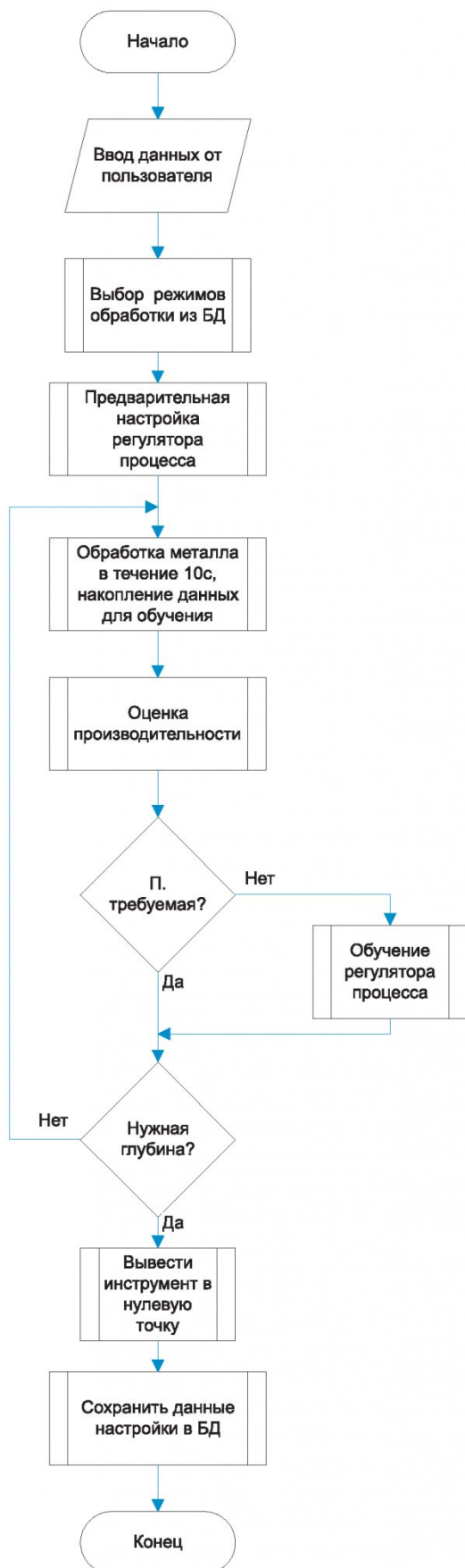


Рис. 3. Алгоритм функционирования СУ

вующих заданному поведению регулятора. Такие

выборки строятся на основе данных, сохраненных в памяти блока обучения нейронной сети. Полученная обучающая выборка используется для подстройки параметров регулятора. Как правило, в ходе обучения нейронной сети существует проблема переобучения, когда сеть не может выполнять поставленные перед ней задачи.

Итогом обучения станет непрерывная адаптация регулятора к изменяющимся условиям обработки.

Разработка функциональной схемы СУ черновым переходом

Для разработки системы управления ЭЭО необходимо определить управляющие параметры и параметры, описывающие состояние процесса обработки.

Состояние ЭЭО можно оценить с помощью величин, измеряемых непосредственно: рабочего напряжения и тока. На основе этих величин можно определить параметры, характеризующие процесс обработки. К таким параметрам относят:

- время задержки искры  $t_D$  – задержка переднего фронта импульса тока относительно переднего фронта импульса напряжения;
- относительное количество холостых импульсов  $\mu_x$ . При холостом импульсе ток отсутствует;
- относительное количество рабочих импульсов  $\mu_p$ . При рабочем импульсе напряжение меньше, чем при холостом импульсе, ток не максимальный;
- относительное количество импульсов короткого замыкания (КЗ)  $\mu_k$ . При коротком замыкании напряжение близко к нулю, ток максимальный.

Регулируемые параметры, которые влияют на производительность, были выявлены в работе [1]. При идеальных условиях производительность зависит от длительности импульса рабочего тока по экстремальному закону, сила тока влияет на положение экстремума. Чем больше рабочий ток, тем выше скорость обработки при прочих равных условиях и положение точки экстремума смещается в сторону увеличения длительности импульса. Производительность так же зависит от величины межэлектродного зазора и носит экстремальный характер. Для обеспечения максимальной производительности необходимо зазор поддерживать на максимально допустимом уровне, при этом учитывать возможность случайных изменений условий обработки (постоянно изменяющееся количество частиц продуктов эрозии). При увеличении производительности обработки увеличивается количество продуктов эрозии, которые мешают ходу протекания процесса, их надо удалять из зазора механизмом прокачки РЖ. Чем выше производительность обработки, тем больший напор РЖ требуется.

На основании этих данных блок адаптивного управления процессом вычисляет требуемые регулируемые параметры, подаваемые на исполни-

тельные устройства станка:

- сервопривода: положение электрода-инструмента  $x$ ;

- генератора импульсов: рабочий ток  $i$ , длительность импульсов  $t_i$ , пауза между импульсами  $t_p$ , время между пачками импульсов  $t_1$ ;

- механизма прокачки: обороты мотора насоса  $n_{wf}$ .

Управление сервоприводом, ГИ и механизмом прокачки требует отдельных контроллеров этих механизмов. Чтобы управление процессом обработки было целостным, необходима согласованная работа этих элементов. Согласование производится контроллером верхнего уровня на основе анализа данных, получаемых анализатором зазора.

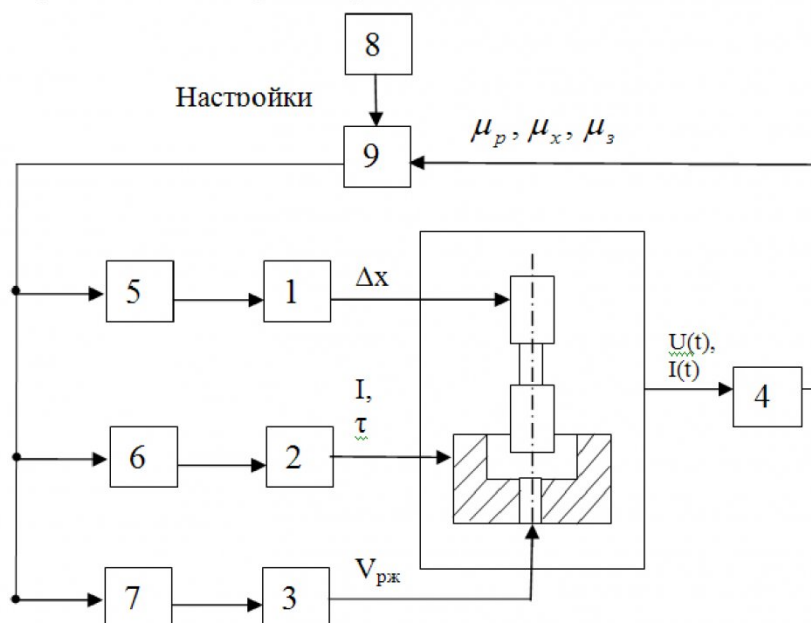


Рис. 4. Блок-схема адаптивной системы управления электроэрозионным станком

На основании проведенного анализа существующих САУ электроэрозионными станками была разработана блок-схема адаптивной системы управления, содержащая три канала управления: сервоприводом 1, генератором тока 2 и системой прокачки рабочей жидкости 3 (рис. 4).

Управление сервоприводом, генератором импульсов и системой прокачки осуществляется посредством контроллеров 5, 6 и 7 соответственно. Адаптивное управление непосредственно процессом ЭЭО осуществляется контроллером 9. Определенные "автоматическим технологом" 8 настройки регулятора, являются исходными данными для адаптивного управления.

Работа системы выглядит следующим образом: блок управления 9 получает сведения о состоянии процесса от анализатора 4 (величины  $\mu_p$ ,  $\mu_x$ ,  $\mu_z$ ), получает сведения о желаемом результате от автоматического технолога 8 и подает команды на блоки управления сервоприводом, ГИ и механизма прокачки. Блок 9 осуществляет адаптивное

управление процессом, для чего используется нейросетевой регулятор. Он позволяет управлять процессом обработки в широких пределах изменения входных параметров и выполнять поставленные целевыми функциями задачи – поддерживать максимальную производительность, ограничивать износ инструмента или выдерживать заданную шероховатость поверхности.

На основании приведенной блок-схемы АСУ разработана функциональная схема системы (рис. 5), где обозначено: Р – регулятор процесса обработки, БЗ – блок записи данных для анализа и подстройки регулятора, ПН – блок подстройки регулятора (обучение), ПН1 – блок предварительной настройки регулятора в начале процесса об-

работки, Р1 – регулятор сервопривода, СП – сервопривод, ДП – датчик положения сервопривода, ЗГ1 – задающий генератор ГИ, У1 – усилитель мощности ГИ, ЗГ2 – задающий генератор механизма прокачки, МП – механизм прокачки, А – анализатор состояния зазора.

#### Синтез структурной схемы СУ

Синтез структурной схемы системы управления разбивается на два основных этапа:

1) разработка структурной схемы каждого блока в отдельности;

2) объединение разработанных схем в единую структурную схему системы управления процессом ЭЭО.

Каждый канал управления – независимая система, управляемая контроллером верхнего уровня. Контроллер верхнего уровня получает данные о состоянии процесса от анализатора и выдает команды блокам управления (контроллерам) отдельных каналов. В этом случае каждый из каналов с



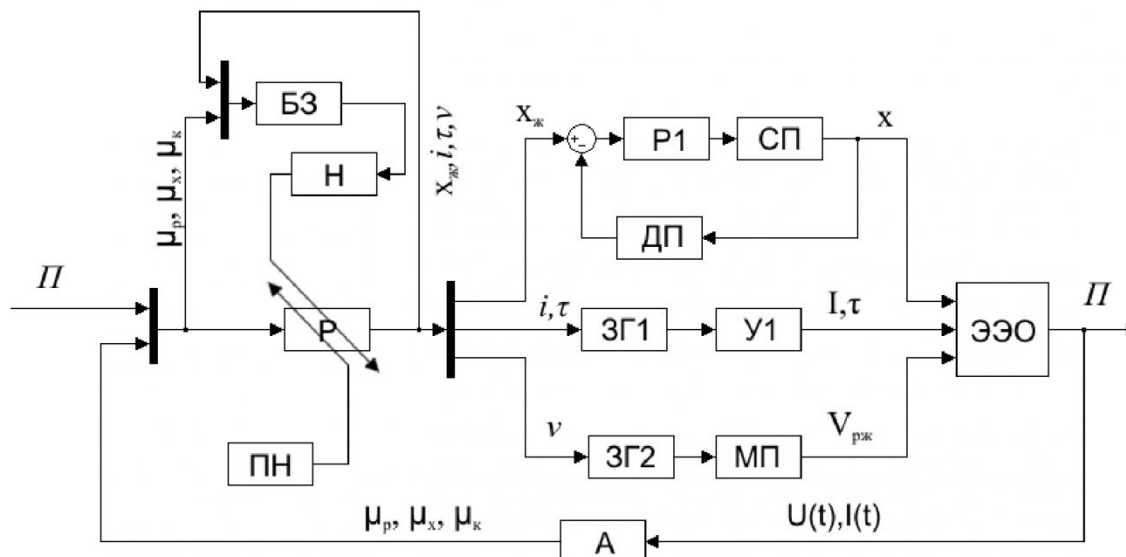


Рис. 5. Функциональная схема адаптивной системы управления электроэрозионным станком полная

точки зрения управления можно рассматривать как автономную систему.

#### Синтез структурной схемы управления сервоприводом

Как было показано выше, одним из важных регулируемых параметров процесса обработки служит величина межэлектродного зазора. Поддержание процесса в стабильном состоянии и обеспечение максимальной производительности требует постоянного изменения положения электрода-инструмента относительно детали. Это обеспечивается при помощи сервопривода – механизма, позволяющего перемещать рабочий орган станка в соответствии с нужными динамическими и точностными характеристиками. Выполняя одно из нефункциональных требований к системе, использование микроконтроллеров, был определен принцип преобразования сигналов МК в механическое движение – электродвигатель. Управление электродвигателем легко согласуется с электронными схемами, применяемыми в блоке управления.

Для устранения недостатков, присущих паре электродвигатель – ходовой винт, был принят сервопривод на базе линейного двигателя (ЛД), в котором происходит прямое преобразование электрических сигналов в линейное перемещение яко-

ря без дополнительных механических передач.

На основе построенных моделей ЛД [5] была разработана структура контроллера двигателя. Одно из требований к контроллеру двигателя – ограничение рабочего тока для того, чтобы мотор не перегрелся. Другая задача контроллера – обеспечение заданного положения якоря. По этой причине система управления содержит два контура обратной связи, один из которых – управление током, внутренний контур. Основной контур – обратная связь по положению. Структурная схема контроллера двигателя приведена на рис. 6.

Входом сервопривода служит желаемое значение координаты якоря двигателя, выходом – реальное ее значение. Для преобразования координаты в электрический сигнал служит датчик положения ЛИР-7 (ДП на схеме), выходом которого являются два синусоидальных выхода со сдвигом по фазе на  $90^\circ$  друг относительно друга. Измеряя данные величины, можно получить изменение текущей координаты. Это значение используется регулятором положения (РП), на вход которого подается отклонение действительной координаты от требуемой и с выхода получается ток, подаваемый на обмотки якоря ЛД. С целью ограничения максимального тока в обмотках якоря в систему управления включен регулятор тока (РТ), который анализирует отклонение значения тока,

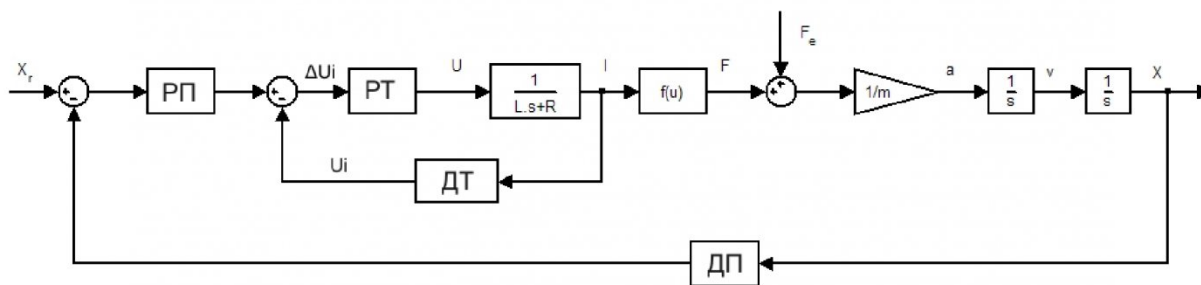


Рис. 6. Структурная схема контроллера ЛД

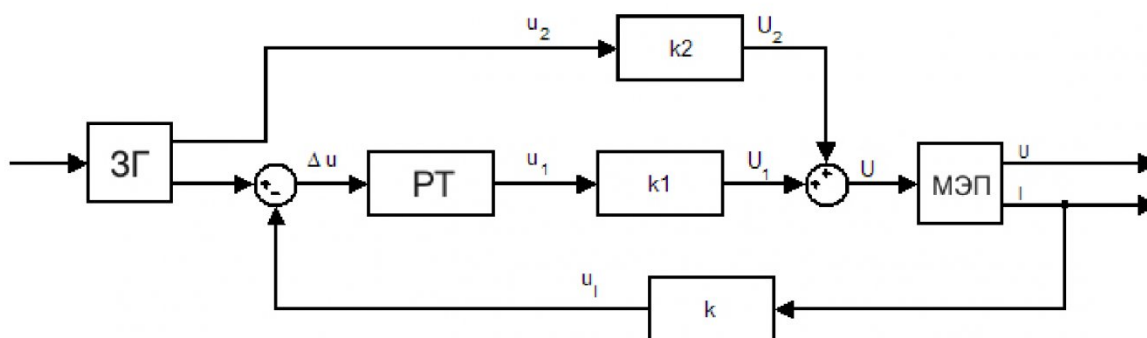


Рис. 7. Структурная схема ГИ

измеренного датчиком тока (ДТ), от требуемого.

Синтез структурной схемы управления генератором

Генератор импульсов является основным каналом регулирования режимов обработки, которое может осуществляться через изменение параметров единичных импульсов и времени паузы между ними или группами импульсами. Основной задачей ГИ служит выработка импульсов электрического тока заданной формы и величины. Для лучшей производительности ГИ должен обеспечивать регулировку длительности каждого импульса или, как минимум, длительность импульсов в одной "пачке" импульсов и длительность интервала времени между пачками.

Длительность и амплитуда импульсов тока определяют плотность теплового потока. В транзисторных источниках питания, содержащих большое число параллельно включенных каскадов с индивидуальными токоограничивающими сопротивлениями, амплитуда импульсов тока на низких и средних частотах пропорциональна числу работающих каскадов. На высоких частотах линейная зависимость не сохраняется из-за влияния распределенной индуктивности разрядной цепи, снижающей токи через все каскады.

Основная задача генератора – выработка заданной последовательности импульсов заданного напряжения и тока.

Необходимо разработать генератор, который обладает гибкостью настройки временных параметров импульсов для использования адаптивной системы управления обработкой. Генератор должен:

- 1) регулировать силу тока;
- 2) регулировать рабочее напряжение импульсов;
- 3) регулировать форму импульсов;
- 4) управляться от контроллера верхнего уровня.

Величина рабочего тока ГИ может достигать десятков ампер, вследствие чего генератор следует разбить на две части – управляющую и силовую. В силовой части будут элементы, выполняющие усиление сигналов, поступающих от управляющей части. Управляющая часть ГИ

предназначена для генерации импульсов требуемой длительности, амплитуда которых соответствует рабочему току.

Структурная схема ГИ приведена на рис. 7. На этом рисунке блок "ЗГ" выполняет роль задающего генератора, вырабатывающего импульсы заданной длительности и амплитуды. Входом этого блока служит уставка, передаваемая я от контроллера верхнего уровня. Верхний по схеме выход ЗГ предназначен для выработки поджигающих импульсов. Дальнейшее усиление этих импульсов усилителем мощности "k2" позволяет подводить требуемую энергию к МЭЗ. Нижний по схеме выход ЗГ предназначен для генерации основных импульсов. Длительность этих импульсов равна длительности импульсов, подводимых к зазору. Требуемое значение рабочего тока задается уровнем напряжения импульсов. Блок "PID" – регулятор тока, управляющий током в зазоре путем изменения напряжения, подаваемого на вход усилителя мощности "k1". Выходы усилителей мощности "k1", "k2" суммируются и результирующие импульсы напряжения подаются на электроды. Рабочий ток измеряется датчиком тока "k", который преобразует ток в напряжение по линейному закону. Преобразованное напряжение используется регулятором тока для своей работы.

Определение параметров элементов структурной схемы

Математическую модель ЗГ можно описать уравнением:

$$y_1 = \begin{cases} 10 & t > nt_1; t < nt_1 + \tau_n \\ 0 & t > nt_1 + \tau_n; t < (n+1)t_1 \end{cases}; \quad (1)$$

$$y_2 = \begin{cases} u & t > n_1t_2; t < n_1t_2 + \tau_u \\ 0 & t > n_1t_2 + \tau_u; t < (n_1+1)t_2 \end{cases}, \quad (2)$$

где  $t$  – текущее время;  $n$  – номер пачки импульсов;  $t_1$  – время между началами пачек импульсов;  $n$  – длительность поджигающего импульса;  $n_1$  – номер импульса в пачке;  $t_2$  – период импульсов;  $\tau_u$  – длительность рабочего импульса;  $u$  – уровень напряжения, соответствующий требуемому рабочему току;  $y_1$  – закон изменения верхнего по схеме



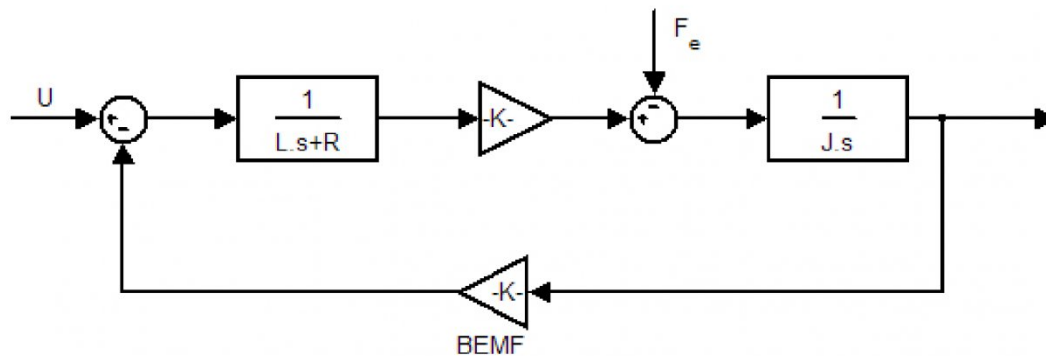


Рис. 8. Структурная схема ДПТ НВ

выхода ЗГ, предназначенного для генерации поджигающих импульсов;  $y_2$  – закон изменения нижнего по схеме выхода ЗГ, предназначенного для генерации рабочих импульсов. Приведенные выше параметры задаются контроллером верхнего уровня.

Усилители мощности "k1", "k2" представляют собой усилительные звенья с коэффициентами усиления 10 и 25 соответственно. Датчик тока – так же усилительное звено с коэффициентом усиления 0,1. Данные величины были выбраны исхо-

инерции ротора;  $F_e$  – внешний момент, приложенный к якорю двигателя, блок "BEMF" моделирует противо-ЭДС, возникающую в обмотке якоря при его вращении.

Кроме электродвигателя в состав механизма прокачки входит и гидравлический насос, как правило, центробежный. В упрощенном варианте центробежный насос представлен усилительным звеном – преобразует число оборотов в поток жидкости, измеряемый в литрах за минуту.

Система управления подачей РЖ может быть

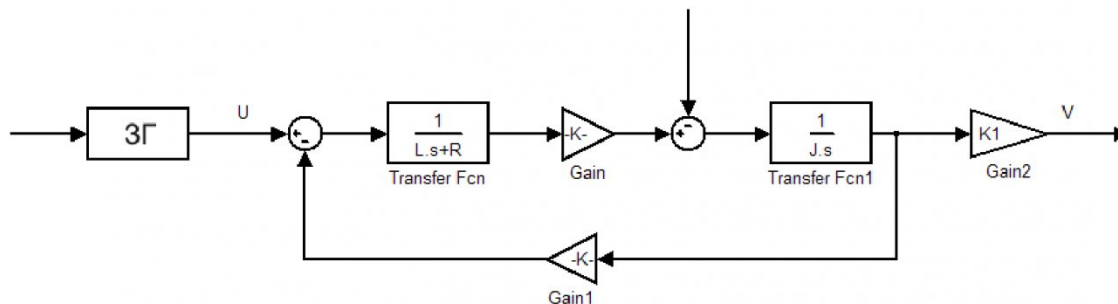


Рис. 9. Структурная схема управления прокачкой РЖ

для из требований к амплитудам рабочих и поджигающих импульсов.

#### Синтез структурной схемы управления механизмом прокачки РЖ

Наличие в МЭЗ продуктов эрозии приводит к неустойчивой работе, уменьшению производительности обработки. По этой причине необходимо удаление отходов (шлама) производства из зазора. Это осуществляется при помощи механизма прокачки РЖ.

К механизму прокачки РЖ предъявляют основное требование – задание производительности насоса, подающего РЖ в зону обработки. Механизм прокачки состоит из электродвигателя и центробежного насоса. К двигателю предъявляется основное требование – регулировка оборотов в широком пределе. Для этой цели можно использовать двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ). Модель ДПТ НВ представлена на рис. 8 [5], где  $U$  – напряжение питания якоря двигателя;  $L$  – индуктивность обмотки;  $R$  – активное сопротивление обмотки;  $J$  – момент

незамкнутой, т.к. обратная связь идет через контроллер верхнего уровня. Структурная схема приведена на рис. 9. На этой схеме блок "ЗГ" – задающий генератор, вырабатывает нужное напряжение для подачи через усилитель "K1" на ДПТ НВ. Блок "K1" предназначен для преобразования частоты вращения электродвигателя в скорость потока РЖ (моделируется насос). Задающий генератор представляет собой ЦАП, управляемый от контроллера верхнего уровня. Диапазон изменения напряжений на его выходе составляет 0-5 В. Максимально допустимое напряжение питания для выбранного двигателя составляет 50 В, значит, коэффициент усиления  $K1 = 10$ .

#### Разработка структурной схемы адаптивной системы управления процессом обработки

Управление процессом обработки подразумевает поддержание МЭЗ на требуемой величине, задание формы импульсов рабочего тока и напора рабочей жидкости, подаваемой в зону обработки. Для управления этими параметрами необходимо прямо или косвенно определить состояние процесса обработки.

Основными измеряемыми величинами, которые можно измерить непосредственно, являются рабочее напряжение и рабочий ток импульсов. На основе этих величин можно вычислить параметры, характеризующие процесс обработки. К таким параметрам относят:

- время задержки искры  $t_D$  – задержка переднего фронта импульса тока относительно переднего фронта импульса напряжения;
- относительное количество холостых импульсов  $\mu_x$ , при холостом импульсе ток отсутствует;
- относительное количество рабочих импульсов  $\mu_p$ , при рабочем импульсе напряжение меньше, чем при холостом импульсе, ток не максимальный;
- относительное количество импульсов короткого замыкания (КЗ)  $\mu_k$ , при коротком замыкании напряжение близко к 0, ток максимальный.

Время задержки искры  $t_D$  так же используется для определения характера импульса. Если  $t_D$  равно 0, импульс КЗ, если  $t_D$  – больше длительности импульса, значит был холостой ход (ХХ), если  $t_D$  отлично от нуля, но меньше длительности импульса, рабочий импульс.

Целью управления процессом служит достижение максимального  $\mu_p$  при полном отсутствии импульсов КЗ. Достижение максимального  $\mu_p$  по-

зволит использовать как можно большее количество импульсов для удаления материала, а импульсы КЗ, приводящие к разрушению электродов, будут отсутствовать. Правила, позволяющие поддерживать стабильный процесс обработки, построены на основе адаптивного алгоритма управления процессом [8]:

1.  $\mu_p$  равно 0,  $\mu_x$  очень большое,  $\mu_k$  равно 0, процесс обработки не идет, электрод необходимо подводить к заготовке.
2. Если  $\mu_p$  большое,  $\mu_x$  малое,  $\mu_k$  равно 0, то процесс идет наилучшим образом, что-либо изменять не требуется.
3. Если  $\mu_p$  не очень велико,  $\mu_x$  не очень мало,  $\mu_k$  равно 0, процесс идет не лучшим образом, электрод довольно далеко, требуется немного приблизить электрод к заготовке.
4. Если  $\mu_p$  очень высокое,  $\mu_x$  очень мало,  $\mu_k$  равно 0, процесс идет очень хорошо, образование продуктов эрозии очень быстрое, возможно возникновение КЗ, требуется немного отвести электрод от заготовки.
5. Если  $\mu_k$  мало, межэлектродный промежуток загрязнен продуктами эрозии, увеличить паузы между пачками импульсов, выполнить релаксацию (отвод электрода из зоны обработки).
6. Если  $\mu_k$  увеличивается, прекратить подачу

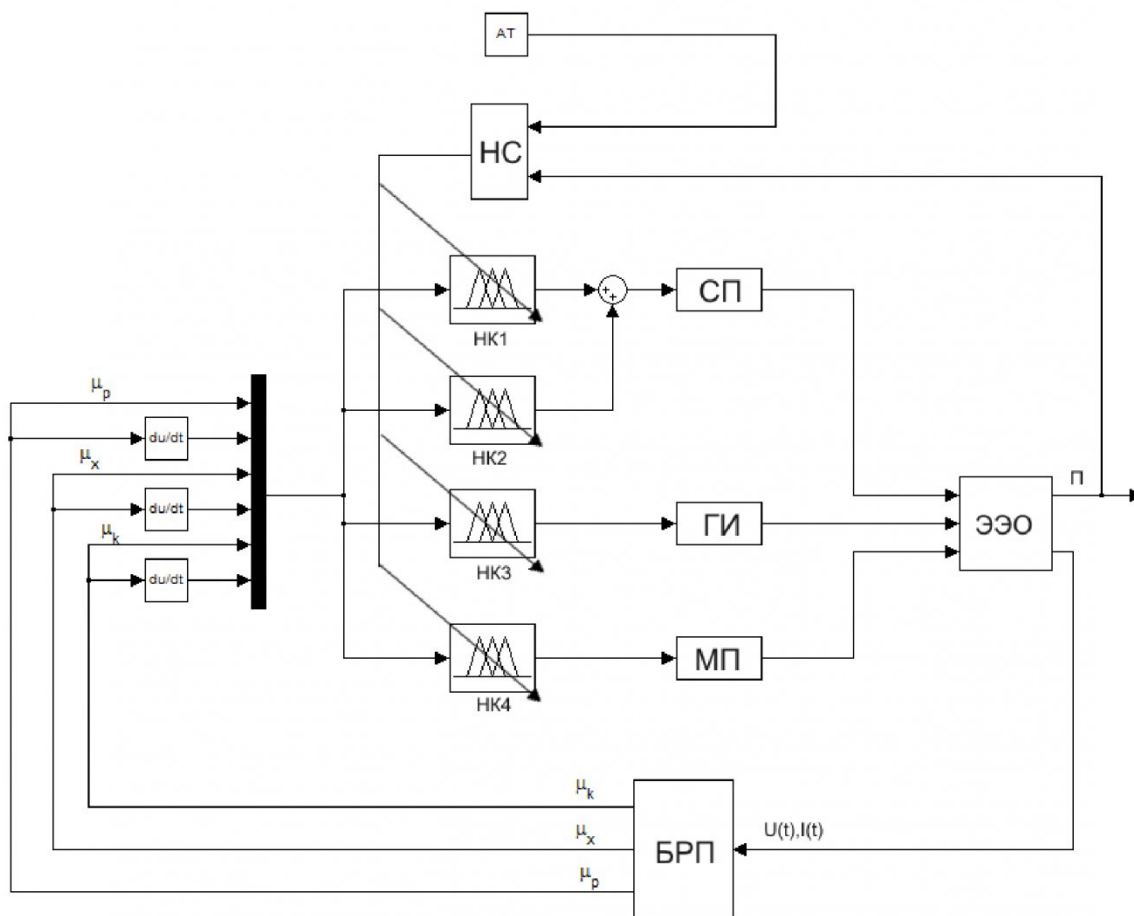


Рис. 10. Структурно-функциональная схема СУ процессом обработки



электрода, приостановить ГИ

7. Если  $\mu_k$  увеличивается быстро, отвести электрод (релаксация), увеличить прокачку РЖ, после некоторой паузы вернуть прокачку РЖ до прежнего уровня.

8. Если усредненное  $\mu_p$  уменьшается, параметры ГИ заданы неверно, требуется увеличить время паузы между импульсами.

9. Если усредненное  $\mu_p$  мало, параметры ГИ заданы неверно, требуется уменьшить время паузы между пачками импульсов.

10. Если  $\mu_k$  больше, при отводе инструмента остаются импульсы КЗ, - начинается спекание частиц продуктов эрозии – "прижег".

11. Если изменение режимов обработки, увеличение прокачки, релаксации электрода не позволяют устранить "прижег" – технологический останов процесса для ручного устранения последствий.

На основе данных правил построена нечеткая система управления процессом обработки (рис. 10), которая состоит из четырех нечетких контроллеров и блока их настройки, основанного на принципах нейронных сетей. На входы каждого из контроллеров подаются параметры  $\mu_p$ ,  $\mu_x$ ,  $\mu_k$  и их первые производные по времени. Эти параметры позволяют реализовать правила, описанные выше. Блок "НК1" (нечеткий контроллер) управляет приводом подачи в ходе процесса обработки, "НК2" управляет релаксацией инструмента и бы-

стрым подводом инструмента в зону обработки на начальном этапе при помощи сервопривода (СП). Блоки "НК3" и "НК4" управляют соответственно генератором импульсов и механизмом прокачки (МП). Блок расчета параметров (БПИ) постоянно измеряет уровень напряжения и рабочего тока и на их основе вычисляет относительное количество разных типов импульсов. Другим выходным параметром процесса ЭЭО служит производительность ( $\Pi$ ), используемая блоком нейросетевого обучения нечетких регуляторов (НС). Как упоминалось выше, этот блок использует данные о предварительной настройке регулятора, поступающие от автоматического технолога.

Каждый из нечетких контроллеров представляет собой нейро-нечеткую сеть ANFIS. Для получения обучающих выборок используется модель процесса обработки, описанная в работе [1]. Для этого на вход модели подаются испытательные сигналы – величина зазора, параметры импульсов и скорость прокачки РЖ. На основе полученных с выхода модели данных, которые включают в себя случайные воздействия, строятся выборки для обучения каждого нечеткого регулятора. Полученные в ходе предварительного обучения данные достаточны для того, чтобы созданная система управления могла управлять реальным процессом. Для улучшения качества регулирования требуется обучение регулятора и в процессе обработки для приспособления к конкретным условиям.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модель процесса электроэрозионной обработки / В. А. Полетаев, И. С. Сыркин // Обработка металлов, 2005. – № 2. – С. 24-28.
2. Де Бруни Х. Э. Устойчивый процесс с использованием импульсов трапециидальной формы // Труды международного симпозиума по электрическим методам обработки: ISEM-7. – Бирмингем, 1983. – С. 75.
3. Золотых В. Н., Мельдер Р. Р. Физические основы электроэрозионной обработки. – М., 1977. – 41 с.
4. Коренблюм М. В. Расчет параметров импульсов при электроэрозионной обработке // Станки и инструмент, 1975. – № 6. – С. 32-33.
5. Полетаев В. А. Управление процессом электроэрозионной обработки: монография / В. А. Полетаев, И. С. Сыркин; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2008. – 232 с.
6. Иоффе В. Ф., Коренблюм М. В., Шавырин В. А. Автоматизированные электроэрозионные станки. – Л.: Машиностроение, 1984. – 227 с.
7. Кениг В., Энинг Х. Электроэрозионная обработка – влияние ступенчатых импульсов тока на результаты работы // Труды международного симпозиума по электрическим методам обработки: ISEM-6. – Варшава, 1980. – С. 77.
8. Бомелли Б. Род и постоянность загрязнений диэлектрика в процессе ЭЭО // Труды международного симпозиума по электрическим методам обработки: ISEM-6. – Варшава, 1980. – С. 169.

□ Авторы статьи:

Полетаев  
Вадим Алексеевич  
– докт. техн. наук, проф.,  
зав. каф. "Информационные и автоматизированные производственные системы"

Сыркин  
Илья Сергеевич  
– ассистент каф. "Информационные и автоматизированные производственные системы"  
Тел. 58-08-11