

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Нуждов Виктор Матвеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА И РАЗРАБОТКА ДВУХКАНАЛЬНОЙ  
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ  
ЭЛЕКТРОСРОЗМОЙНОГО ОБЪЕМНОГО КОПИРОВАНИЯ



Специальность 05.13.07 - "Автоматизация технологических  
процессов и производств (промышленность)"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Изаков Ф. Я. ;

кандидат технических наук  
Свешников В. К.

Ведущее предприятие - Троицкий станкостроительный завод.

Защита состоится 26 июня 1992 г., в \_\_\_\_\_ часов, на заседании специализированного совета Д 053.13.06 Челябинского государственного технического университета по адресу: 454080, г. Челябинск, просп. им. В. И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧГТУ.

Автореферат разослан "\_\_\_\_\_" мая 1992 года.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат технических наук \_\_\_\_\_ / Барькин С. Г. /

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из основных направлений развития машиностроительного комплекса нашей страны является все более широкое применение прогрессивных базовых технологий, позволяющих повысить производительность труда, улучшить условия производства, снизить затраты материальных и энергетических ресурсов. К числу таких технологий относится электроэрозионное объемное копирование, которое является разновидностью электроэрозионной обработки (ЭЭО) и применяется для изготовления фасонных полостей в заготовках штампов, прессовых и литевых форм и других изделий из твердых сплавов и закаленных сталей.

Практика ЭЭО на копировально-прошивочных станках показывает, что существующие автоматические регуляторы не всегда обеспечивают стабильный рабочий процесс, особенно при чистовой обработке заготовок с большой рабочей площадью. Автоколебания, возникающие в системе подачи электрода-инструмента (ЭИ), приводят к снижению производительности и точности обработки, вследствие чего возрастает доля последующей слесарной доводки при изготовлении крупных штампов. Для решения проблемы устойчивости процесса ЭЭО во всем диапазоне режимов целесообразно использовать наиболее быстродействующий исполнительный канал - генератор импульсов. Однако, разработку соответствующей двухканальной системы регулирования затрудняют недостаточная изученность процесса и низкая точность его известных динамических моделей.

Изложенное указывает на необходимость дальнейшего исследования процесса ЭЭО и совершенствования систем автоматического управления режимом электроэрозионного объемного копирования.

Целью работы является повышение качества регулирования параметров режима ЭЭО, позволяющее расширить область стабильной работы копировально-прошивочных станков.

Методы исследования. Для достижения поставленной цели были использованы основные положения теории ЭЭО, методы теорий вероятностей и случайных процессов, математического моделирования, теории матриц и теории автоматического управления. Экспериментальное исследование физических процессов, протекающих в рабочей зоне станка, выполнено путем изучения закономерностей распределения зарядов по обрабатываемой поверхности. Для регистрации координат

разрядов применялись киносъемка и запись осциллограмм координатных сигналов. Динамические свойства процесса обработки изучались с использованием частотного метода идентификации.

Научная новизна. Предложена методика экспериментального определения скрытого от непосредственного наблюдения пространственного распределения разрядов; показано, что процесс возникновения разрядов можно рассматривать как последовательность зависимых испытаний, образующих марковскую цепь. Оценена роль температурных деформаций электродов в динамике процесса ЭЗО.

Разработана вероятностная модель пробоя межэлектродного промежутка (МЭП), учитывающая последствие разрядов.

Получено математическое описание процесса объемной ЭЗО с учетом пространственного распределения его параметров и предложены две дополняющие друг друга модели.

Впервые в практике исследования ЭЗО сняты логарифмические частотные характеристики процесса обработки, описано влияние технологических условий на динамические свойства этого объекта.

Показано, что стабильность процесса ЭЗО можно повысить путем введения контура быстрого регулирования среднего рабочего тока через генератор импульсов. Предложены принципы согласования работы регуляторов среднего тока и подачи ЭИ и принципы построения быстродействующих устройств для защиты от межэлектродных коротких замыканий (МКЗ).

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные математические модели и экспериментальные данные позволяют повысить точность расчетов и моделирования автоматических систем копировально-прошивочных станков, улучшить программную подналадку регуляторов. Разработанные устройства регулирования рабочего тока и защиты от МКЗ обеспечивают повышение стабильности и производительности электроэрозионного объемного копирования при затрудненных условиях обработки, снижают вероятность наростообразования в МЭП. Методика исследования пространственного распределения разрядов (ПРР) может быть использована при оптимизации режимов ЭЗО.

Реализация результатов работы. Методика определения координат разрядов использовалась в ЭНИМСе (г. Москва) при разработке системы программно-адаптивного управления процессом ЭЗО, а на Запорожском автозаводе внедрена система управления для крупного копировально-прошивочного станка, за создание которой автор

награжден серебряной медалью ВДНХ СССР (удостоверение N 5222).

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на 8-й Всесоюзной научно-производственной конференции по электрофизическим и электрохимическим методам обработки в Ленинграде (1977г.), на семинаре "Электрофизикохимическая обработка материалов" в Троицке (станкоавод, 1979г.) и на научно-технических конференциях Челябинского государственного технического университета в 1977 - 1991 годах.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 5 статей, тезисы доклада, научно-технический отчет и получено 6 авторских свидетельств СССР на изобретения.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 115 страницах машинописного текста, иллюстрирована 51 рисунком и 11 таблицами на 48 страницах и состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 117 наименований на 12 страницах и 7 приложений на 22 страницах.

На защиту выносятся:

1. методика и результаты исследования пространственного распределения разрядов;
2. математические модели процесса ЭЭО, учитывающие пространственное распределение параметров МЭП и вероятностный механизм возникновения разрядов;
3. результаты экспериментального исследования статических и динамических свойств процесса ЭЭО как объекта регулирования;
4. способ повышения устойчивости и качества регулирования режима ЭЭО за счет введения контура быстрого регулирования среднего рабочего тока через генератор импульсов;
5. принципы построения регулятора среднего тока и устройств быстродействующей защиты от МКЗ.

Список принятых сокращений

ВЭП - время задержки пробоя; ЛЧХ \* - логарифмические частотные характеристики; МКЗ - межэлектродные короткие замыкания; МО - математическое ожидание; МЭЗ - межэлектродный зазор; МЭП - межэлектродный промежуток; ПРР - пространственное распределение разрядов; РП - регулятор подачи; РТ - регулятор (среднего) тока; САРП - система автоматического регулирования подачи; ЭИ - электрод-инструмент; ЭЭО - электроэрозионная обработка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### 1. Состояние вопроса и задачи исследования

Обработка на электророзионных копировально-прошивочных станках выполняется с помощью импульсных электрических разрядов, возбуждаемых в жидкой диэлектрической среде между ЭИ и заготовкой. Требуемый для этого межэлектродный зазор (МЭЗ) поддерживается регулятором подачи (РП), который осуществляет перемещения ЭИ и заготовки по сигналам, связанным с величиной МЭЗ.

В процессе копирования изменяются параметры электрического режима, а также глубина и площадь обработки, гидравлическое сопротивление МЭП, температура и другие параметры рабочей зоны. Это приводит к изменениям статических и динамических свойств процесса ЭЭО, в результате чего возможно возникновение нежелательных автоколебаний. На крупных станках эту проблему осложняют большая подвижная масса, значительная площадь МЭП и взаимное влияние секций при многоконтурной ЭЭО. Поиск способов повышения устойчивости процесса требует детального изучения связей между переменными с учетом пространственного распределения параметров МЭП.

Исследованию физических процессов, протекающих в рабочей зоне станка, посвящены работы Б. Р. и Н. И. Лазаренко, Б. Н. Золотых, А. С. Зингермана, А. И. Круглова, А. Л. Лившица и других ученых. В них рассматриваются механизмы съема материала, эвакуации продуктов эрозии и защиты ЭИ от износа, влияние МЭЗ и свойств рабочей среды на производительность обработки и т. п. При этом сведения о ПРР носят преимущественно качественный характер, поскольку отсутствует надежный метод регистрации координат разрядов в естественных условиях обработки, а роль температурных деформаций электродов изучена лишь в связи с их влиянием на точность копирования.

Математические модели процесса ЭЭО как объекта управления рассмотрены в работах Б. Г. Гуткина, А. И. Беврука, В. А. Власенко, Ю. С. Волкова и других исследователей. Основу моделей составляет, как правило, уравнение динамики МЭЗ, которое дополняется, прежде всего, функцией связи МЭЗ с контролируемой переменной. Как показывает анализ, известные модели не учитывают такие факторы, как пространственное распределение параметров МЭП и последствие разрядов, слабо подкреплены экспериментальными данными. В частности, отсутствуют логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ)

процесса и данные о влиянии на них расхода прокачиваемой через МЭП рабочей жидкости.

Регулирование режима электроэрозионного объемного копирования осуществляется по трем основным каналам: через привод подачи ЭИ, генератор импульсов и устройства для прокачки рабочей жидкости. Причем, для быстрой отработки возмущений в станках с независимым генератором используется только канал подачи. Например, в отечественной системе управления обработкой ПАК-ЭНИМС изменение групповой паузы между импульсами производится в последнюю очередь с задержкой до нескольких десятков секунд. Между тем, используя генератор как наиболее быстродействующий исполнительный канал, можно повысить качество регулирования и, тем самым, расширить область стабильной работы станков.

Анализ состояния вопроса показал, что для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. исследовать закономерности распределения разрядов по обрабатываемой поверхности и оценить влияние температурных деформаций электродов на процесс ЭЭО;

2. разработать математическое описание процесса ЭЭО с учетом пространственного распределения его параметров и вероятностного механизма возникновения разрядов;

3. экспериментально определить необходимые статические и динамические характеристики объекта для различных технологических условий (выполнить непараметрическую идентификацию);

4. исследовать влияние параметров объекта на устойчивость системы автоматического регулирования подачи (САП) и разработать метод повышения качества регулирования параметров режима ЭЭО;

5. разработать элементы двухканальной системы автоматического регулирования режима, обеспечивающие расширение области стабильной работы станков.

## 2. Исследование физических процессов при массовом воздействии разрядов на электроды

Во второй главе излагаются результаты экспериментального исследования ПРР и влияния температурных деформаций электродов на динамику МЭЭ. Опыты проводились на копировально-прошивочном станке с шаговым электроприводом, оснащенном генератором импульсов типа ШГИ-40-44С.

Исследование ПРР выполнялось по осциллограммам координатных сигналов и кадрам киносъемки картины распределения, воспроизводимой на экране электронно-лучевого осциллографа. Для этого была разработана установка, в которую входят тонкостенный графитовый ЭИ, являющийся одновременно преобразователем координат разрядов в напряжение, усилители сигналов, двухкоординатный электронно-лучевой осциллограф и модулятор яркости. Диаметры ЭИ и стальной заготовки были равны 80 мм, погрешность преобразования координат не превышала 4-5%.

В процессе наблюдения было установлено, что наибольшее влияние на вид ПРР оказывают параметры импульсов генератора, геометрические характеристики МЭП и скорость потока жидкости в зоне разрядов. Картины распределений условно могут быть разделены на три основных вида: 1) случайное распределение с большой степенью разброса разрядов относительно их геометрического центра; 2) локальное распределение на небольшой площадке; 3) сочетание первых двух видов. При чистовой обработке обычно наблюдается локальное распределение, поскольку энергия разрядов в этом случае недостаточна для разбрасывания частиц по значительной площади.

Характер ПРР изменяется в зависимости от текущего положения области минимальных зазоров и скоплений частиц в МЭП. Перемещение зоны разрядов может быть хаотичным или упорядоченным. Причем, упорядоченное перемещение зоны по направлению потока рабочей жидкости приводит к автоколебаниям процесса ЭЭО.

Чтобы оценить длительность последствия разряда, изучались законы распределения расстояний  $\bar{l}$  между соседними разрядами и между разрядами, взятыми через один, т.е. с номерами 1-3, 2-4 и т.д. Эти законы сравнивались с теоретическим законом, полученным для равномерного ПРР без последствия по кругу с радиусом  $R$ . Соответствующее выражение для плотности вероятности имеет вид

$$f(l) = 8\bar{l} \left( \arccos \bar{l} - \bar{l} \sqrt{1 - \bar{l}^2} \right) / \pi R, \quad \bar{l} = l/2R. \quad (1)$$

Сравнение законов (рис.1) показало, что влияние разряда на ближайший последующий импульс значительно выше, чем на второй. В связи с этим сделан вывод, что процесс возникновения разрядов можно рассматривать как последовательность зависимых испытаний, образующих простую марковскую цепь.



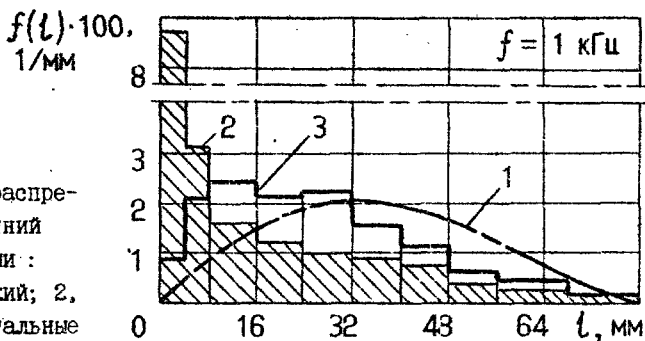


Рис. 1. Законы распределения расстояний между разрядами:  
1 - теоретический; 2, 3 - экспериментальные

Оценивание влияния температурных деформаций на динамику МЭЗ производилось при обработке цилиндрическими графитовыми ЭИ одинаковых с ними по сечению стальных заготовок с площадью от 10 до 50 кв. см. В опытах регистрировались средний рабочий ток, температура в середине заготовки на расстоянии 1...6 мм от рабочего торца и изменение длины заготовки при скачке скорости подачи.

Установлено, что скорость температурного удлинения заготовки зависит от площади обработки и может достигать 30% и более от линейной скорости эрозии. При использовании принудительной подачи температурные деформации приводят к перерегулированию МЭЗ и являются основной причиной перерегулирования среднего рабочего тока. В связи с этим данное явление следует учитывать в условиях эксперимента и при многоконтурной обработке на станках с общим приводом секций ЭИ.

### 3. Математическое описание процесса ЭЭО как объекта регулирования

При объемном копировании рабочая площадь, как правило, значительно больше площади единичной лунки, а общее количество продуктов эрозии в МЭП больше, чем образуется при одном разряде. Кроме того, микронеровности на рабочих поверхностях электродов создают статистический разброс местных межэлектродных расстояний и, тем самым, способствуют уменьшению дискретности изменений пробивного МЭЗ. За счет этих факторов и достаточно высокой частоты импульсов тока процесс ЭЭО можно рассматривать как непрерывную систему, описываемую дифференциальными уравнениями для математических ожиданий импульсных величин.

В работе предложена обобщенная схема такой системы, звеньями которой являются частные интегральные процессы. К ним относятся: 1) процесс изменения МЭЗ; 2) импульсный случайный процесс пробоя; 3) процесс выделения энергии в МЭП; 4) съем материала и образование продуктов эрозии; 5) процесс изменения количества продуктов эрозии в МЭП; 6) возникновение сил между электродами и 7) процесс изменения теплового состояния электродов.

В качестве внешних воздействий в данной схеме приняты: вектор скорости подачи  $\vec{U}_n(t)$ , давление прокачки  $p_{ж}(t)$  и параметры импульсов изочастотного генератора. Для учета загрязненности МЭП введены параметры, аналогичные МЭЗ - условная или средняя толщина слоя частиц  $S_4(\vec{r}, t)$  и условная толщина парогазового слоя  $S_2(\vec{r}, t)$ . Здесь  $\vec{r}$  - радиус-вектор точки на обрабатываемой поверхности.

Процесс изменения МЭЗ  $S(\vec{r}, t)$  описывается уравнением

$$p S(\vec{r}, t) = U_3(\vec{r}, t) - U_T(\vec{r}, t) - U_n(t) \cos \varphi(\vec{r}) + p S_{yc}(\vec{r}, t), \quad (2)$$

где  $p = d/dt$  - оператор дифференцирования;  $U_3$  - сумма линейных скоростей эрозии электродов;  $U_T$  - скорость температурного изменения МЭЗ;  $U_n$  - модуль вектора скорости подачи;  $\varphi$  - угол между вектором подачи и нормалью к обрабатываемой поверхности;  $S_{yc}$  - изменение МЭЗ за счет упругих деформаций станка.

Выходными переменными импульсного случайного процесса являются: математическое ожидание (МО) времени задержки пробоя (ВЭП)  $t_{3\beta}$ , МО длительности разрядов  $t_p$ , условные  $\alpha$ ,  $\beta$  и средняя  $\lambda$  вероятности пробоя МЭП. Последние определяются по формулам:

$$\alpha = F_\alpha(\tau), \quad \beta = F_\beta(\tau) \quad \text{при} \quad \tau = t_n - 0; \quad \lambda = \frac{\beta}{1 - \alpha + \beta}, \quad (3)$$

где  $F_\alpha(\tau)$  - функция распределения ВЭП для импульсов, возникающих после разряда,  $F_\beta(\tau)$  - то же для ВЭП после предыдущего холостого импульса,  $t_n$  - длительность импульсов напряжения.

С частотой разрядов вероятности пробоя связаны соотношениями:

$$\alpha = 1 - f_{rp} f_p^{-1}; \quad \beta = f_{rp} (f - f_p)^{-1}; \quad \lambda = f_p f^{-1}, \quad (4)$$

где  $f$  - средняя частота импульсов напряжения;  $f_p$  - МО частоты разрядов;  $f_{rp}$  - МО частоты следования групп разрядов.

Для описания механизма ПРР межэлектродный промежуток представлен в виде электрически параллельных частей - электроэрозивных ячеек. Моделью распределения разрядов между  $n$  ячейками является цепь Маркова с  $(n + 1)$  состоянием.

Чтобы определить вид функций распределения ВЭП, предложена гипотеза, согласно которой пробой происходит вследствие выброса случайного поля пробивных напряжений, характеризующего электрическую прочность МЭП, за нижний уровень, равный амплитуде холостых импульсов напряжения. В результате получено:

$$F_{\alpha}(\tau) = 1 - \exp[-\alpha_{\Sigma}(\tau + \tau_{\beta})]; \quad F_{\beta}(\tau) = 1 - \exp[-\alpha(\tau + \tau_{\beta})]; \quad (5)$$

$$t_{3\partial} = (1 - \lambda)(t_{и} - t_{подж}) + \frac{\lambda}{\alpha_{\Sigma}}[\alpha - F_{\alpha}(0)] + \frac{1 - \lambda}{\alpha}[\beta - F_{\beta}(0)], \quad (6)$$

где  $\alpha$ ,  $\alpha_{\Sigma}$  - средняя частота выбросов случайного поля после холостого импульса и разряда соответственно;  $\tau_{\beta}$  - средняя длительность выбросов;  $t_{подж}$  - длительность поджигающих импульсов.

В главе на основе расчетных схем составлены также уравнения остальных компонентов процесса ЭЭО.

На основе исходных уравнений разработаны две дополняющие друг друга модели процесса ЭЭО: полная одноячеечная модель объекта с сосредоточенными параметрами и ячейчная модель для нормальных условий обработки. Процесс пробоя МЭП представлен в полной модели звеном с выходами по вероятности  $\lambda$  и относительной длительности разрядов

$$\bar{t}_p = (t_{и} - t_{3\partial}) / t_{и}.$$

Ячеечная модель (рис. 2) получена при допущении, что влиянием величин  $U_T$ ,  $S_{yc}$  и  $S_2$  на динамику процесса можно пренебречь. Для записи уравнений введены одностолбцовые  $n$ -мерные матрицы скоростей  $U_n$ ,  $U_3$ ,  $U_{n,4}$ , зазоров  $S$  и толщин слоя частиц  $S_4$ , матрица частот выбросов случайного поля пробивных напряжений  $A_j$ , матрицы долевых коэффициентов  $\chi = a_j a^{-1}$  и средних токов ячеек  $I_j$ . Введены также квадратные матрицы параметров: косинусов углов  $(\Psi_j)$  -  $r$ , удельных линейных скоростей эрозии  $U_{j,3}$  и матрица  $\Phi$  коэффициентов эвакуации; матрица-строка  $\Sigma = [1, 1, \dots, 1]$ , а также коэффициент доли пиролитического графита в общем количестве частиц  $K_{в.г.}$ . Выходной величиной является средний рабочий ток  $I$ :

Согласно модели передаточные функции процесса по каналам "МЭЭ - средний ток" и "частота  $f$  - средний ток" без учета скоростей эрозии электродов имеют вид отношений полиномов  $n$ -ного порядка. При  $n = 2$  передаточная функция, например, для МЭЭ, приводится к виду

$$W_S(p) = \frac{\Delta \bar{I}(p)}{\Delta t_n(p)} = k_S k^2 \frac{T^2 p^2 + 2T \xi_2 p + 1}{k^2 T^2 p^2 + 2kT \xi_1 p + 1}, \quad (7)$$

где  $k_S$  - коэффициент линеаризации функции  $\bar{t}_p(-s)$ ;  $k^2 \geq 1$ ;  $\bar{I} = I/I(1)$  - относительное значение среднего тока;  $I(1)$  - значение среднего тока при  $\bar{t}_p = 1$ ;  $\Delta t_n = \Delta U_n / p$ .

#### 4. Экспериментальное определение статических и динамических характеристик процесса ЭЭО

Задача повышения точности моделей процесса ЭЭО потребовала проведения исследований с использованием методов непараметрической идентификации динамических систем. Предметом исследований были статические характеристики МЭП, ЛЧХ и характеристики МКЭ.

Для создания воздействий на процесс в генератор ШГИ-40-440 были встроены управляемые элементы, обеспечивающие плавное изменение рабочей частоты и амплитуды поджигающих импульсов. В опытах измерялись и записывались сигналы, пропорциональные среднему рабочему напряжению, относительной длительности разрядов и вероятности пробоя МЭП. Обработка стальных заготовок велась графитовыми и медными ЭИ на обратной полярности.

Определение условных вероятностей пробоя производилось по формулам (4). Полученные кривые  $\alpha(\beta)$  подтвердили правильность принятой модели пробоя и показали, что при уменьшении паузы между импульсами разность  $(\alpha - \beta)$  возрастает.

Определение зависимостей переменных  $\bar{t}_p$  и  $\lambda$  от МЭЭ производилось путем сближения электродов со скоростью 46 мм/с до появления МКЭ. В опытах использовались кольцевые электроды с толщиной стенки 5 мм и рабочей площадью 17 кв. см, что позволило существенно ослабить влияние степени загрязненности рабочей среды на коэффициент передачи МЭП. Варьируемыми параметрами были скважность и частота импульсов э. д. с., амплитуда тока, давление прокачки и амплитуда поджигающих импульсов. Характеристики строились по ансамблю из 10-15 осциллограмм.

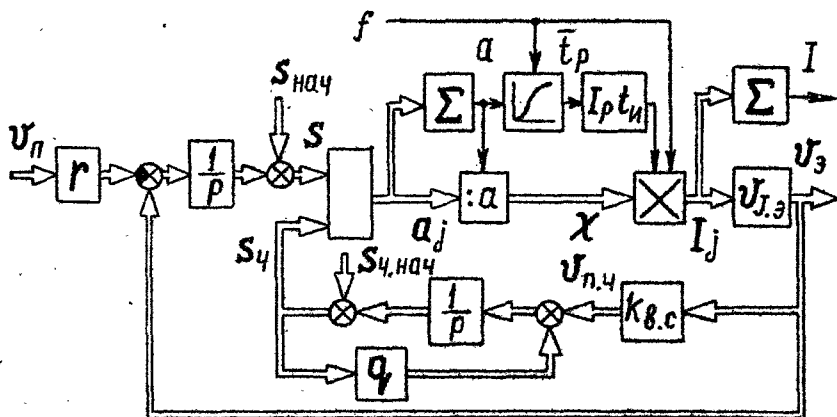


Рис. 2. Векторная структурная схема процесса 330 (ячеечная модель)

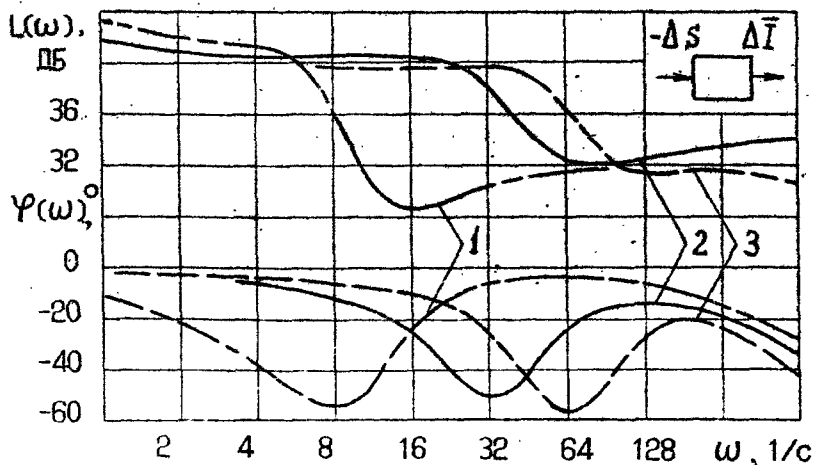


Рис. 3. Экспериментальные ЛЧХ процесса 330 при расходе прокачиваемой жидкости, куб. см./с: 1) 0,5, 2) 2,5, 3) 5,0; параметры импульсов: 8 кГц, скважность 1,2, амплитуда тока 56 А; \* канал "МЭЗ - средний ток"

Анализ полученных кривых показал, что в области  $0,2 < \bar{t}_p < 0,8$  коэффициент передачи МЭП изменяется от 20...25 1/мм на черновых режимах до 200...300 1/мм на чистовых. Уменьшение энергии импульсов и поджигающего напряжения и увеличение давления прокатки приводят к смещению характеристик в сторону меньших зазоров.

Логарифмические частотные характеристики процесса ЭЭО снимались для каналов передачи  $f-\lambda$ ,  $f-I$  и  $S-I$  с помощью измерителя частотных характеристик "Вектор", созданного на кафедре электропривода Челябинского государственного технического университета. Рабочая точка объекта соответствовала значениям величин  $\bar{t}_p$  и  $\lambda$  в пределах от 0,4 до 0,6. Синусоидальные колебания МЭЗ создавались с помощью кулачкового электромеханического преобразователя, установленного на каретке механизма подачи ЭИ.

Чтобы устранить влияние регулятора подачи, обработка велась при разомкнутой САРП. Параметры рабочей точки могли изменяться за счет случайного характера процесса ЭЭО. Поэтому при определении каждой точки ЛЧХ делалось 10...15 последовательных замеров, значения синфазной и квадратурной составляющих усреднялись, и по ним с учетом поправок на фильтры рассчитывались амплитуда и фаза выходных колебаний.

В процессе исследования площадь обработки варьировалась от 10 до 100 кв. см. Примеры наиболее типичных ЛЧХ канала "МЭЗ - средний ток", полученных при обработке сплошных круглых заготовок с площадью 25 кв. см., приведены на рис. 3.

Исследование показало, что ЛЧХ каналов  $f-I$  и  $S-I$  близки по форме и соответствуют виду расчетных ЛЧХ. В диапазоне частот  $\omega > > 2$  1/с процесс может быть представлен звеном второго порядка с передаточной функцией, описываемой формулой (7). Причем, положение и величина максимума запаздывающей фазы в ЛЧХ каждого из каналов зависят от расхода прокачиваемой жидкости, площади обработки и длины трассы эвакуации частиц.

Характеристики случайных МКЗ снимались при МЭЗ, соответствующем относительной длительности разрядов  $\bar{t}_p = 0,92...0,97$ . Установлено, что при использовании медных и графитовых ЭИ шунтирующие переемычки из частиц разрушаются, как правило, в течение одного импульса тока. Для выбора времени задержки срабатывания защиты от МЭЗ получены графики средней частоты появления МКЗ, длительность которых больше заданной величины  $\tau_k$ :

$$f(\tau_k) = f \cdot [1 - F(\tau_k)] \quad , \quad (8)$$

где  $F(\tau_k)$  - функция распределения случайных МЭЗ по длительности.

Анализ изложенных результатов позволил сделать вывод, что в исследованной области параметров предложенные математические модели адекватно отображают статические и динамические свойства процесса ЭЭО.

#### 5. Исследование устойчивости и улучшение качества регулирования рабочих величин процесса ЭЭО

В пятой главе исследуется влияние параметров модели процесса ЭЭО на устойчивость состояний равновесия САРП, предлагается способ повышения устойчивости и качества регулирования, рассматриваются вопросы построения двухканальной системы автоматического регулирования режимов.

При анализе работы системы использовалась приближенная нелинейная модель процесса ЭЭО, полученная на основе ячеечной модели путем аппроксимации функции МЭЗ и толщины слоя частиц  $\rho_a(s, s_4)$  уравнением плоскости. При этом введено понятие электрического МЭЗ

$$s_{эл}(t) = s(t) - b_4 s_4(t) - \tilde{s}_{эл}(t) \quad (9)$$

и выделено звено с передаточной функцией

$$G(p) = b_4 k_s \Delta s_4(p) / \Delta \bar{I}(p) = 1 - k_s W_s^{-1}(p) \quad , \quad (10)$$

учитывающее динамику процесса эвакуации частиц и ПРР. Здесь  $\rho_a$  - поверхностная плотность потока выбросов случайного поля пробивных напряжений,  $b_4$  - коэффициент влияния средней толщины слоя частиц  $s_4(t)$ ,  $\tilde{s}_{эл}(t)$  - возмущающее воздействие. Привод подачи ЭИ представлен колебательным звеном с постоянной времени  $T_\Pi$ .

Выполненный на ЭВМ расчет граничных линий области устойчивости линеаризованной САРП показал, что при  $T < (3 \dots 4) T_\Pi$  происходит резкое уменьшение допустимого коэффициента передачи разомкнутой системы. Введение корректирующих устройств в РП не дает ощутимого эффекта, поскольку параметры объекта случайны. В связи с этим предложено ввести в систему регулятор среднего рабочего тока (РТ), с помощью которого ослабляется влияние внутренней положительной обратной связи процесса ЭЭО, замыкающейся через

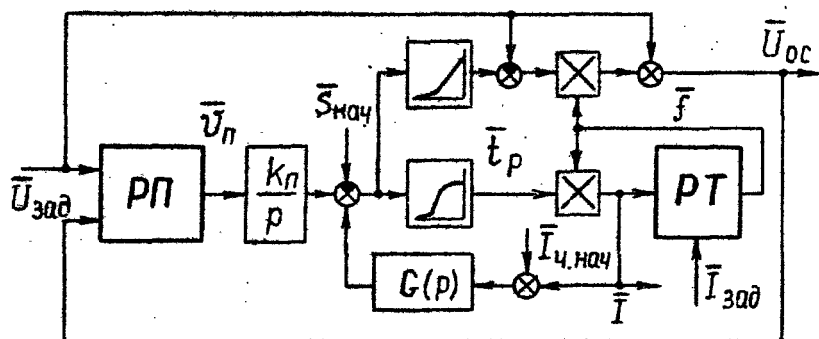


Рис. 4. Структурная схема двухканальной системы автоматического регулирования режимов

звено с передаточной функцией  $G(p)$  (рис. 4). Чтобы устранить влияние РТ на установившееся значение МЭЭ, напряжение обратной связи для РП предложено формировать по закону

$$\bar{U}_{о.с.} = (\bar{U}_{о.с.1} - \bar{U}_{зад})\bar{f} + \bar{U}_{зад},$$

где  $\bar{U}_{о.с.1}$  - напряжение обратной связи при относительной частоте импульсов  $\bar{f} = 1$ .

После начала обработки РТ ограничивает темп нарастания среднего тока, а затем поддерживает ток на заданном уровне  $\bar{I}_{зад}$  если  $\bar{t}_p \geq \bar{I}_{зад}$ . Кроме того, через напряжение  $\bar{U}_{ос}$  РТ влияет на работу РП, обеспечивая быстрое снижение скорости ЭИ при вхождении в рабочую зону. Для выполнения этого алгоритма РТ содержит два фильтра нижних частот первого порядка, суммирующий усилитель-ограничитель и компаратор напряжений.

Анализ и моделирование работы двухканальной системы показали, что применение РТ позволяет расширить область устойчивости "в малом" до границ, соответствующих идеальному процессу ЗЭО с передаточной функцией  $G(p) = 0$ . При этом перерегулирование МЭЭ уменьшается в 2...4 раза, что при  $K_S = 0,1$  1/мкм соответствует снижению перебега ЭИ при вхождении в рабочую зону на 5...10 мкм.

Испытания двухканальной системы показали, что положительный эффект от введения РТ состоит - прежде всего - в возможности стабильного поддержания МЭЭ и малых рабочих токов, благодаря чему



улучшаются условия врезания ЭИ и точность обработки. При чистовой обработке больших площадей максимум производительности в двухканальной системе может превышать производительность ЭЭО в системе без РТ на 5...30 %.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для адекватного математического описания процесса электроэрозионного объемного копирования необходимо учитывать закономерности пространственного распределения разрядов и температурные деформации электродов.

2. Предложенная методика исследования ПРР позволяет наблюдать движение аон разрядов в МЭИ и измерять расстояния между разрядами. Изучение последних показало, что процесс возникновения разрядов можно рассматривать как последовательность испытаний, образующих марковскую цепь.

3. Локальная плотность среднего рабочего тока зависит от условий пробоя во всем промежутке. Это свойство процесса отображено в ячеечной модели в виде внутренних перекрестных связей.

4. Полученное математическое описание процесса ЭЭО позволяет создавать различные модели объекта регулирования. Показано, что без учета скорости эрозии электродов передаточные функции линеаризованного объекта по каналам "МКЗ - средний ток" и "частота генератора - средний ток" могут быть представлены в виде отношения полиномов одинакового порядка.

5. В диапазоне частот  $\omega > 1...2$  1/с процесс ЭЭО может быть описан с помощью звена второго порядка. Постоянная времени этого звена обратно пропорциональна расходу прокачиваемой жидкости, а фазовая частотная характеристика лежит в области отрицательных значений и может достигать  $-70...-80$  град.

6. Время задержки срабатывания устройств для защиты от МКЗ следует выбирать в пределах длительности одного импульса. Минимальное значение этого параметра определяется по условию допустимых потерь на ликвидацию случайных МКЗ.

7. Система автоматического регулирования подачи теряет устойчивость в первую очередь при близких значениях постоянных времени привода и процесса ЭЭО. В связи с этим обработку следует вести с минимально необходимым расходом прокачиваемой рабочей жидкости.

8. Для повышения устойчивости и качества регулирования режима

объемного копирования целесообразно использовать отрицательную обратную связь по среднему току с воздействием на МЭП через частоту генерируемых импульсов. Это позволяет уменьшить перерегулирование МЭЗ при начале обработки в 2...4 раза.

9. Применение предложенного регулятора тока приводит к расширению области стабильной работы копировально-прошивочных станков, позволяет легко задавать требуемое значение среднего рабочего тока, а применение разработанных устройств быстродействующей защиты от МЭЗ обеспечивает снижение вероятности наростообразования и потерь времени на ликвидацию замыканий.

#### ТРУДЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Астраханцев Н. Я., Нуждов В. М. О возможности применения принудительной подачи инструмента при электроэрозионной обработке // Сб. науч. трудов Челяб. политехн. ин-та, N 176. - Челябинск, 1976. - С. 173-179.

2. Нуждов В. М. Пространственное распределение разрядов при электроэрозионной обработке // Электрофизические и электрохимические методы обработки. - М.: НИИмаш, 1977. - Вып. 11. - С. 3-7.

3. Астраханцев Н. Я., Нуждов В. М. Некоторые вопросы управления процессом электроэрозионной обработки: Тез. докл. 8-й Всесоюзной научно-произв. конференции по электрофиз. и электрохим. методам обработки. - Л., 1977.

4. А. с. 622613 СССР, МКИ4 В 23 Н 1/02. Устройство для защиты от коротких замыканий при электроэрозионной обработке / Н. Я. Астраханцев, В. М. Нуждов. - Оpubл. 05.09.78. Бюл. N 33.

5. А. с. 738816 СССР, МКИ4 В 23 Н 1/02. Устройство для защиты от коротких замыканий при электроэрозионной обработке / Н. Я. Астраханцев, В. М. Нуждов. - Оpubл. 05.06.80. Бюл. N 21.

6. А. с. 743827 СССР, МКИ4 В 23Н 1/04. Электрод-инструмент для исследования электроэрозионного процесса обработки / В. М. Нуждов. - Оpubл. 30.06.80. Бюл. N 24.

7. А. с. 778987 СССР, МКИ4 В 23 Н 1/02. Устройство для защиты от коротких замыканий при электроэрозионной обработке/ В. М. Нуждов - Оpubл. 15.11.80. Бюл. N 42.

8. А. с. 952495 СССР, МКИ4 В 23 Н 1/02. Генератор импульсов для электроэрозионных станков/ В. М. Нуждов. - Оpubл. 23.08.82. Бюл. 31.

9. А. с. 1003240 СССР, МКИ В 23 Н 1/02. Устройство для защиты от коротких замыканий при электроэрозионной обработке / В. М. Нудов - Оpubл. 07.03.83. Бюл. N 9.

10. Нудов В. М. Модель пространственного распределения разрядов в межэлектродном промежутке электроэрозионного станка / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1986. - 20 с. - Деп. в ВИНТИ 27.08.86, N 6201-В86.

11. Нудов В. М. Вероятностная модель пробоя промежутка при электроэрозионной обработке / Ред. ж. "Электрон. обраб. матер." АН МССР. - Кишинев, 1987. - 14 с. - Деп. в ВИНТИ 02.09.87, N 6441-В87.

12. Нудов В. М. Математическое описание процесса объемной электроэрозионной обработки как объекта регулирования / Челяб. политехн. ин-т. - Челябинск, 1989. - 31 с. - Деп. в ВИНТИ 27.06.89, N 4241-В89.

Личный вклад соискателя в работы, опубликованные в соавторстве:

[1] - обоснование метода и его экспериментальная проверка;  
[3] - анализ способов управления генератором импульсов, исследование ПРР; [4, 5] - разработка алгоритмов работы и исследование устройств быстродействующей защиты от МКЗ.

*В. Нудов*

---

Подписано к печати 18.05.92. Формат 60x90 1/16. Печ. л. 1.  
Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 117/311.

---

УОП ЧГТУ. 454080. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.