нгельсский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ СТАНКОВ

Методические указания к практическим работам по курсу «Оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки»
для студентов направлений
15.03.05 – «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

очной и заочной форм обучения

Энгельс 2025 г.

УДК 621.9.07
ББК 34.5-5

Стекольников М.В., Тихонов Д.А. Изучение конструкции универсальных электроэрозионных станков: Методические указания к практическим работам по курсу «Оборудование электрофизических и электрохимических методов обработки» – Энгельс: Изд-во ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2023. – 34 с.

Рецензенты**:**

В учебно-методическом пособии приведены методические рекомендации для выполнения практических работ по дисциплинам, связанным с изучением конструкции оборудования для электроэрозионной обработки.

УДК 621.9.07
ББК 34.5-5

Одобрено редакционно-издательским советом
ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Брошюра издается в авторской редакци

КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ СТАНКОВ

1. Генераторы импульсов

Одним из важнейших элементов электроэрозионного оборудования является генератор импульсов (ГИ). ГИ необходим для создания импульсов электрической энергии, подводимых к межэлектродному промежутку.

Для ЭЭО используют различные схемы генераторов импульсов, отличающихся друг от друга принципом действия и производимым технологическим эффектом.

В настоящее время в ЭЭ-станках применяются релаксационные, магнитонасыщенные, ламповые и полупроводниковые генераторы. При расчете и выборе генератора исходят из условия получения формы и мощности импульса, обеспечивающих требуемые технологические показатели процесса. Как правило, черновую и чистовую обработку производят от одного и того же генератора [9, 13].

Первыми генераторами импульсов, устанавливающимися на электроэрозионные станки, были релаксационные RC-генераторы. Данные генераторы предложили использовать создатели метода ЭЭО Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко.

Поскольку релаксационные генераторы имели ряд существенных недостатков, им на смену пришли ламповые генераторы, а также машинные генераторы с приводом от электродвигателей. Данные генераторы позволяют получать импульсы большей мощности, что позволяет производить обработку крупногабаритных заготовок с высокой производительностью. Основным недостатком машинных генераторов является их уровень шума при работе, поэтому в настоящее время они практически не применяются.

Современным этапом в развитии генераторов импульсов стало появление магнитонасыщенных генераторов и генераторов на полупроводниковых приборах (транзисторы и тиристоры).

1.1. Релаксационные генераторы

К ним относятся генераторы, у которых параметры импульса определяются состоянием межэлектродного промежутка. Это RC-генераторы (рис. 1, *а*), RLC-генераторы (рис. 1, *б*) и RCL-генераторы (рис. 1, *в*); CL и LC-генераторы, у которых в зарядный или разрядный контуры включены индуктивные элементы и исключен токоограничи-вающий резистор (рис. 1, *г*); CC-генератор, у которого ограничение тока обеспечивается конденсатором в зарядной цепи (рис. 1, *д*).

Все релаксационные генераторы содержат зарядную и разрядную (на рис. 1 последняя выделена жирной линей) цепи. В зарядной цепи установлены источник питания ИП и выключатель К. В RC-, RLC- и RCL-схемах, кроме того, предусмотрен токоограничивающий резистор R. Разрядная цепь содержит конденсатор С и межэлектродный промежуток МЭП, а в RCL-схеме (см. рис. 1, *в*) помимо этого в разрядную цепь включен индуктивный элемент *L* [13].

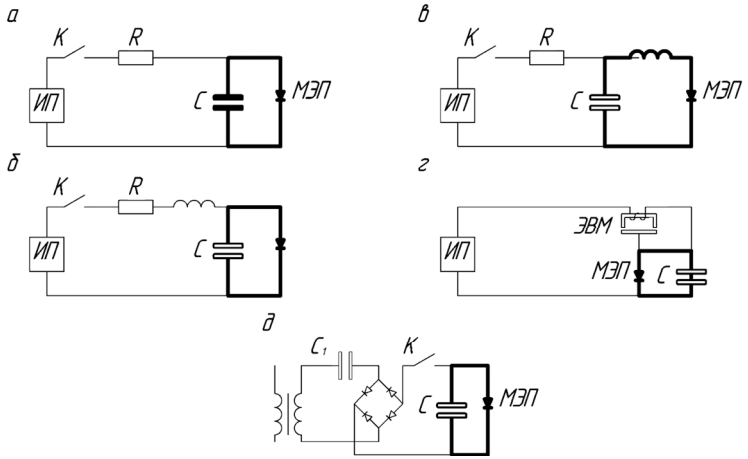


Рис. 1. Схемы релаксационных импульсных генераторов:
а – RC-генератор; *б* – RLC-генератор; *в* – RCL-генератор;
г – CL- и LC-генераторы; *д* – CC-генератор

Рассмотрим принцип работы RC-генератора с начального момента, когда конденсатор С не заряжен (см. рис. 1, *а*). При замыкании выключателя К конденсатор С через резистор R заряжается от

источника питания ИП [13]. В результате напряжение на конденсаторе С, а следовательно, и на межэлектродном промежутке МЭП повышается. Когда оно достигает пробивного для данного размера межэлектродного промежутка, происходит его пробой, и энергия, запасенная в конденсаторе С за время заряда, выделяется в МЭП. После этого напряжение на конденсаторе падает, и разряд через межэлектродный промежуток прекращается. С этого момента начинается период деионизации межэлектродного промежутка, т.е. восстановление его диэлектрической прочности, и возобновляется зарядка конденсатора С. Время разрядки конденсатора определяется постоянной времени $\tau = RC$. Отсюда следует, что для нормального протекания процесса необходимо, чтобы время зарядки было больше периода деионизации МЭП, в противном случае возможен переход импульсного разряда в дуговой. Необходимое соотношение этих периодов осуществляется подбором сопротивления резистора R и емкости С. Чем их значения больше, тем медленнее происходит зарядка конденсатора.

По мере удаления металла с поверхности заготовки расстояние между электродами возрастает и достигает такой величины, при которой напряжение на конденсаторе оказывается недостаточным для разряда. Поэтому для поддержания электроэрозионного процесса необходимо сближать электроды до требуемого значения МЭП. При этом, если их сближать быстрее, чем происходит удаление металла под действием эрозии, то разряды будут происходить при низком напряжении, а следовательно, иметь малую энергию. Поэтому, несмотря на то, что частота следования разрядов возрастает, скорость съема металла снижается. В случае весьма малых расстояний между электродами паузы межу разрядами окажутся недостаточными для деионизации промежутка, и процесс перейдет в дуговой. Из вышеизложенного следует, что режим работы релаксационного RC-генератора определяется физическим состоянием межэлектродного промежутка. В таких генераторах значительная доля энергии теряется на нагрев резистора R. В связи с этим КПД таких генераторов не превышает 25 %, а мощность ограничивается 5–7 кВт. Поэтому RC-генераторы применяются в основном для чистовой обработки на электроискровом режиме.

В RLC-генераторах (см. рис. 1, *б*) за счет включения в заряд-ную цепь индуктивного элемента L удается ускорить процесс заряд-ки конденсатора и повысить напряжение на нем. Это иллюстрирует-ся графиками (рис. 2) изменения напряжения на конденсаторах при RC- (кривая *1*) и RLC-генераторах (кривая *2*). Как видно, период τ_0'' импульса на кривой *2* существенно меньше периода τ_0' на кривой *1*, что достигнуто благодаря сокращению времени зарядки $\tau_1\left(\tau_1'' < \tau_1'\right)$. При напряжении зарядки U'', конденсатора при RLC-схеме выше, чем у RC-генератора (U_3'). Кроме того, за счет сокращения времени прохождения тока через резистор снижаются потери на его нагрев, а поэтому КПД у RLC-генераторов значительно выше [9, 13].

Как видно из рис. 2, после разряда напряжение резко снижается до нуля и затем меняет знак, т.е. возникает так называемая обратная полуволна. Ее стремятся уменьшить, так как она вызывает ускоренный износ электрода-инструмента. Однако в RC- и RLC-схемах этого сделать не удается.

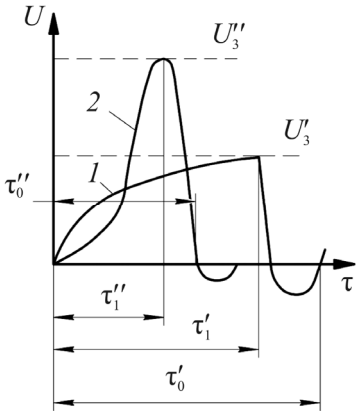


Рис. 2. Графики изменения напряжения на конденсаторах: *1* – для RC-генератора; *2* – для RLC-генератора

Решить эту задачу и тем самым резко снизить износ электрода-инструмента можно, если включить индуктивный элемент в разрядную цепь (см. рис. 1, *в*). Но в этом случае снижается производительность, поэтому RCL-генераторы применяют для чистовых операций, когда необходимо без изменений сохранить форму и размеры электрода-инструмента. Причем в таких схемах используется обратная полярность (инструментом является анод).

Для повышения КПД создают генераторы, в которых токоограничивающий резистор вообще отсутствует. Так, в LC-схеме (см. рис. 2.1, *г*) в зарядную цепь введен электромагнитный вибратор

ЭВМ, с якорем которого жестко связан электрод-инструмент. При включении тока якорь притягивается к сердечнику и перемещает электрод-инструмент от заготовки; цепь разрывается и происходит зарядка конденсатора С от ИП. Когда конденсатор заряжен, ток в обмотке вибратора ЭВМ прекращается, якорь отскакивает от сердечника, электрод-инструмент возвращается к заготовке и в момент сближения происходит разряд. Для эффективной работы LC-генератора необходимо, чтобы вибратор колебался синхронно с изменением напряжения генератора, что усложняет его настройку. Поэтому LC-генераторы используются для какого-либо одного режима и, благодаря большой мощности, применяются главным образом на черновых операциях.

В CC-генераторах (см. рис. 1, *д*) также отсутствует токоограничивающий резистор, что способствует повышению его КПД. В этом случае для ограничения тока в зарядную цепь включен конденсатор C_1. Ток через трансформатор, выпрямитель, конденсатор C_1, выключатель К заряжает конденсатор С. Разряд в этом случае происходит аналогично RC-схеме. Мощность таких генераторов ограничена и не может превышать несколько киловатт, поэтому CC-генераторы применяются весьма редко и только для черновой обработки.

При расчете параметров RC-генераторов в его основу положены требования к качеству поверхности после обработки. Так, для чистовых операций это шероховатость поверхности, а для черновых – отсутствие микротрещин в поверхностном слое.

Релаксационные генераторы позволяют обеспечить высокую производительность процесса, так как с ростом энергии импульса возрастает время накопления заряда и падает частота следования импульсов.

1.2. Ламповые генераторы

На рис. 3 представлена схема лампового генератора, в котором электронная лампа Л служит переключающим прибором, управляющим импульсами напряжения. В этом случае параметры генератора не зависят от физического состояния межэлектродного промежутка, а поэтому искровой разряд не может перерасти в дуговой. Это дает

возможность реализовывать при обработке импульсы с высокой частотой следования, не принимая во внимание протекание процесса деионизации промежутка [13].

Принцип работы генератора заключается в следующем. После подачи от задающего генератора ЗГ напряжения на управляющую сетку лампы Л в ней появляется ток, и на вторичной обмотке трансформатора $T_р$ возбуждается импульсная ЭДС, под действием которой происходит пробой МЭП. С помощью задающего генератора регулируется период между импульсами, т.е. их скважность. Для эффективной работы лампового генератора необходима прокачка рабочей жидкости через МЭП.

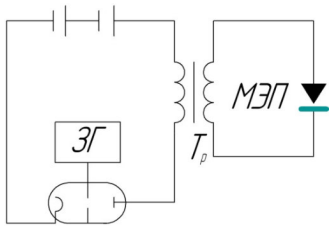


Рис. 2.3. Схема лампового генератора

Применение ламповых генераторов позволяет повысить частоту следования импульсов до 20 кГц и получить импульсы малой длительности. Недостатками ламповых генераторов являются низкий КПД, необходимость применения источников питания с напряжением до нескольких тысяч вольт и ограничения энергии импульса.

1.3. Магнитонасыщенные генераторы

По сравнению с ламповыми эти генераторы обеспечивают более высокую энергию импульса. Наибольшее распространение получил генератор с магнитными усилителями, схема которого приведена на рис. 4 [13].

К зажимам генератора подводят напряжение $U_с$ от сети, которое поступает на выпрямитель $Д_1$-$Д_4$, и далее на магнитный усилитель, состоящий из дросселей $Др_1$ и $Др_2$. Через их рабочие обмотки $W'_р$ и $W''_р$ протекает ток межэлектродного промежутка, а через обмотки управления $W'_у$ и $W''_у$ протекает ток от управляющего источника постоянного напряжения.

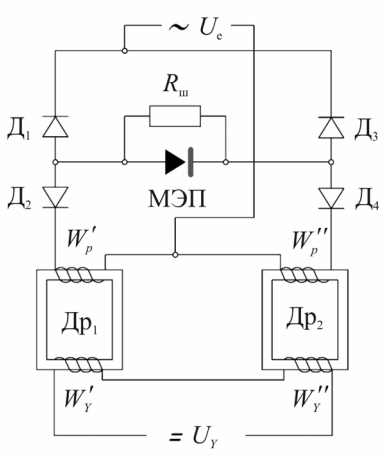


Рис. 4. Схема магнитонасыщенного генератора

Принцип работы генератора заключается в следующем. В положительный период сетевого напряжения $U_с$ ток протекает через диод $Д_3$, межэлектродный промежуток МЭП, диод $Д_2$ и рабочую обмотку дросселя $Др_1$. Сердечники дросселей выполнены из магнитомягкого материала, и такие дроссели имеют нелинейную вольтамперную характеристику. Поэтому, пока материал магитопровода не насыщен, ток, протекающий по цепи, растет медленно. Когда сила тока достигнет значения тока насыщения, ток в обмотке резко возрастет, в результате чего на промежутке образуется импульс с крутым передним фронтом. После прохождения рабочего импульса сердечник дросселя должен быть размагничен, для чего используется обмотка управления $W'_у$, работающая от источника $U_у$.

В отрицательный полупериод сетевого напряжения $U_с$ ток проходит через обмотку $W''_р$ дросселя $Др_2$, диод $Д_4$, межэлектродный промежуток МЭП и диод $Д_1$. После насыщения сердечника дросселя $Др_2$ возникает импульс, протекающий через МЭП, насыщение магнитопровода снимается управляющей обмоткой $W''_у$. Резистор $R_ш$, включенный параллельно от МЭП, позволяет снимать заряд при разомкнутых электродах.

Магнитонасыщенные генераторы сравнительно просты, надежны в работе, позволяют получить большую энергию импульса. Однако их работа и, в частности, частота следования импульсов зависят от частоты питающего сетевого напряжения. Поэтому при использовании трехфазных магнитных усилителей наибольшая частота следования импульсов не может превышать 150 Гц. Такая частота применима только для черновой обработки на грубых режимах [9, 13].

1.4. Генераторы на управляемых полупроводниковых приборах

Применение управляемых полупроводниковых приборов дает возможность создать генераторы с очень широким диапазоном режимов обработки, у которых частота следования импульсов не зависит от свойств межэлектродного промежутка. На практике применяются два вида генераторов этого типа: на основе инверторов, в которых управляемые тиристоры регулируют период зарядки и разряда конденсатора в релаксационных генераторах, и широкодиапазонные генераторы импульсов.

На рис. 5 приведена схема генератора импульсов, у которого зарядная и разрядная цепи разделены [13]. В качестве токоограничивающего элемента применена катушка индуктивности *L*. Конденсатор С заряжается при включении тиристора T_1 от блока управления тиристорами БУТ. После снижения зарядного тока до нуля тиристор T_2. Происходит разряд конденсатора С через межэлектродный промежуток МЭП. При этом время выключения тиристора T_2 отрегулировано так, чтобы отсечь обратную полуволну, вызывающую ускоренный износ электрода-инструмента. Параллельно промежутку МЭП включен резистор $R_ш$, что позволяет конденсатору разряжаться при разомкнутых электродах. В рассматриваемой схеме в зарядной цепи отсутствует активное сопротивление, что позволяет снизить потери и исключить возможность появления дуговых разрядов. В качестве недостатка данной схемы следует отметить непостоянство напряжения пробоя, что приводит к изменению режима обработки.

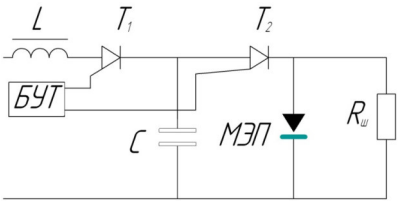


Рис. 5. Схема генераторов на управляемых тиристорах

С целью стабилизации напряжения пробоя применяются схемы генераторов со стабилитроном Ст (рис. 6). Заряд конденсатора в этом случае происходит через резистор R или можно использовать катушку индуктивности. Во время зарядки тиристор Т закрыт

и только после достижения на конденсаторе С напряжения, превышающего напряжение стабилизатора, на управляющий электрод тиристора Т подается открывающее напряжение. Поэтому разряд через МЭП происходит со строго дозированной энергией [13].

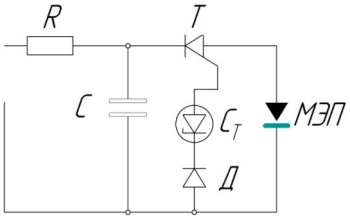


Рис. 6. Схема генераторов импульсов со стабилизацией напряжения пробоя

С помощью широкодиапазонных генераторов можно получать импульсы с частотой от 1 до 900 кГц и выходным током 16–180 А, т.е. они позволяют работать на всех режимах электроэрозионной обработки. Помимо этого они вырабатывают импульсы такой формы, при которой обеспечивается минимальный износ электрода-инструмента.

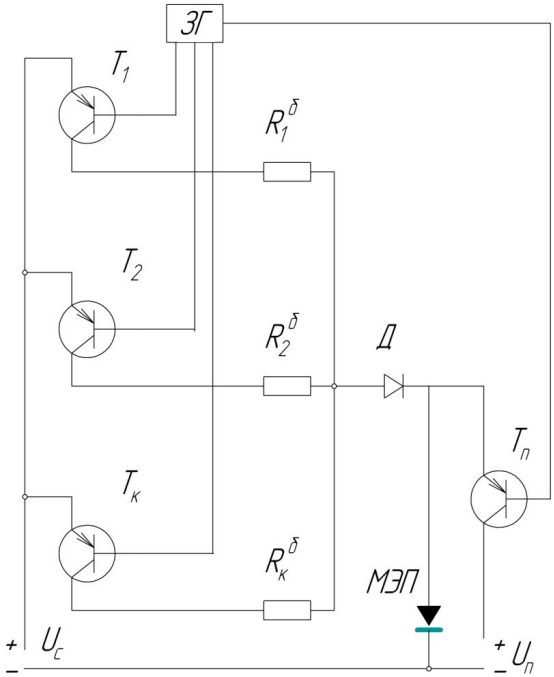


Рис. 7. Схема широкодиапазонного генератора импульсов

На рис. 7 приведена схема широкодиапазонного генератора ти-па ШГИ [13]. Он включает в себя две части: блок поджигающих импульсов (на рисунке справа от МЭП) и силовой блок. Блок поджигающих импульсов имеет малую мощность, но высокое напряжение $U_п$ = 100…300 В, а силовой блок дает напряжение $U_с$ = 60…70 В, но обладает большей мощностью. Оба блока управляются задающим генератором ЗГ.

Принцип работы такого генератора состоит в следующем. После сигнала от задающего генератора ЗГ на включение транзистора $Т_п$ через межэлектродный промежуток МЭП пройдет импульс высокого напряжения от блока поджигающих импульсов, происходит пробой, затем напряжение снижается, но остается канал проводимости. В этот момент от задающего генератора ЗГ подается сигнал на включение транзисторов $Т_1$, $Т_2$…$Т_к$ и одновременно открывается диод Д. Ток от силового блока поступает в межэлектродный промежуток МЭП и протекает через образовавшийся канал проводимости. Время включения транзисторов $Т_1$, $Т_2$…$Т_к$ определяет длительность импульсов, а необходимую их форму получают включением балластных резисторов $R_1^б, R_2^б, ... R_к^б$, в силовом блоке.

2. Станины станков

Несущую систему электроэрозионного станка образует совокупность его элементов, через которые замыкаются силы, возникающие между инструментом и заготовкой в процессе обработки. К основным элементам несущей системы станка относятся станина и корпусные детали (поперечины, плиты, столы, суппорты и т.п.).

Станина служит для монтажа деталей и узлов станка, относительно нее ориентируются и перемещаются подвижные детали и узлы. Станина, как и другие элементы несущей системы, должна обеспечивать в течение срока службы станка возможность обработки заготовок с заданными режимами и точностью. Это достигается правильным выбором конструкции, материала станины и технологии ее изготовления для обеспечения необходимой жесткости, виброустойчивости и износостойкости направляющих.

Основным материалом для изготовления станин служат чугун – для литых станин, сталь – для сварных. Для изготовления станин тяжелых станков иногда применяется железобетон. Для станин станков высокой точности применяется искусственный материал – синтегран, изготовляемый на основе крошки минеральных материалов и смолы. Этот материал характеризуется незначительными тепловыми деформациями.

Несущую систему станка стремятся сделать наиболее жесткой. Эта характеристика оптимальна у станков портального типа (рис. 2.8, *а*), но с неподвижным порталом [3]. У станков с подвижным порталом, имеющим по отдельному приводу на каждую стойку, отмечается так называемое пошаговое движение портала, вызываемое рассогласованием в работе приводов, разным трением в направляющих и др.

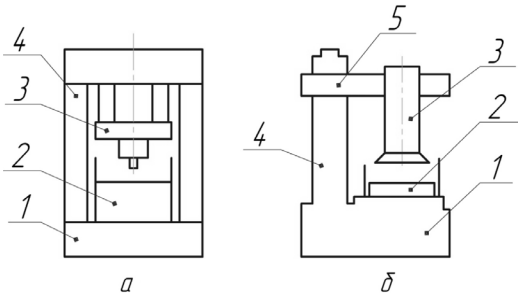


Рис. 8. Варианты компоновки ЭЭ станков: *а* – портальный тип; *б* – одностоечный консольный; *1* – основание (станина); *2* – обрабатываемая заготовка; *3* – шпиндель (электрододержатель); *4* – стойка; *5* – пиноль

Наименее удачной схемой несущей системы принято считать схемы пинольного построения (рис. 8, *б*), у которых при различных взаимных положениях элементов станка меняются характеристики жесткости.

Большое влияние на точность обработки оказывает схема размещения рабочего стола и его размеры относительно размеров станины с направляющими. В неудачных конструкциях стол свешивается с направляющих в крайних положениях (рис. 9, *а*), что вызывает погрешности при работе станка.

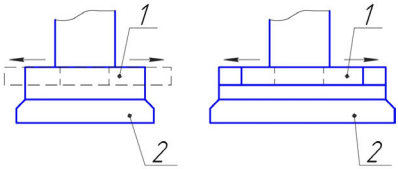


Рис. 9. Возможные схемы размещения рабочих столов у ЭЭ-станков: *а* – узкая станина, стол свешивается в крайних положениях; *б* – широкая жесткая станина, полностью исключающая свешивание рабочего стола в крайних положениях: *1* – стол; *2* – станина

Схемы компоновки электроэрозионных станков с применением широких станин обладают повышенной жесткостью, что, в свою очередь, позволяет минимизировать потери точности от изменения нагрузок на стол при его перемещениях. Такая станина полностью исключает свешивание рабочего стола в крайних положениях (рис. 2.9, *б*) [3].

3. Приводы подач

Одним из главнейших элементов, определяющих суммарную погрешность обработки, является привод подач. От привода подач зависит точность линейного позиционирования рабочих органов, точность возврата рабочих органов в заданную точку, точность отработки привода в режиме заданной интерполяции и др.

Привод должен обеспечивать бесступенчатое регулирование рабочих подач в большом диапазоне, а также высокие скорости холостых ходов. Привод должен обладать плавностью хода, особенно при медленных перемещениях, повышенной долговечностью и т.д.

По принципу работы приводы бывают электрические, электромеханические, гидравлические и электрогидравлические.

Электрическим приводом называется устройство, преобразующее электрическую энергию в механическую и управляющее параметрами сформированного при этом движения. Основным элементом электропривода является электрический двигатель, в котором и происходит преобразование энергии. Управление параметрами движения осуществляют с помощью преобразователя основного управляющего параметра, датчика обратной связи, задающего устройства, устройства защиты и т.д.

Можно выделить следующие типы электрических приводов подач, используемые в станках с ЧПУ [3]:

– от асинхронного двигателя через коробку подач (механический) с переключением от электромагнитных муфт;

– от электродвигателя постоянного тока с преобразователями для регулирования частоты вращения в широких пределах, например с тиристорным регулированием;

– электрический с низкооборотным двигателем постоянного тока на высокоэнергетических постоянных магнитах;

– гидравлический от гидроцилиндров или гидродвигателей, при этом гидродвигатель обычно устанавливают на конечное звено привода (чаще всего это пара «винт – гайка качения»);

– на электрических шаговых двигателях;

– на линейных двигателях.

3.1. Шаговые двигатели

До настоящего времени наиболее применимы были приводы с шаговыми двигателями и передачей винт – гайка в виде шаровинтовой пары (ШВП). Однако применение приводов с ШВП в оборудовании с ЧПУ имеет ряд недостатков, связанных с необходимостью использования в приводе длинных винтов, которые являются основными источниками возникновения погрешностей в работе приводов.

Проблемы с точностью традиционных приводов с шаговым двигателем и шаровинтовыми парами давно известны. Это прежде всего накопленная погрешность в шаге винта и его температурные деформации. У передач даже с винтами высокого класса накопленная ошибка может составлять 3–4 мкм на 300 мм и 7–8 мкм на 1000 мм. Для ходовых винтов ШВ приводов характерны и большие температурные деформации. Так, например, метровый ходовой винт из нержавеющей стали при нагреве всего на 1 °С удлиняется на 15–18 мкм. А температуры нагрева винта при интенсивной работе ШВ привода могут быть значительно выше [3].

Шаговый электродвигатель – это синхронный бесщёточный электродвигатель с несколькими обмотками, в котором ток, подаваемый в одну из обмоток статора, вызывает фиксацию ротора. После-

довательная активация обмоток двигателя вызывает дискретные угловые перемещения (шаги) ротора.

Конструктивно шаговые электродвигатели состоят из статора, на котором расположены обмотки возбуждения, и ротора, выполненного из магнитомягкого (ферромагнитного) материала или из магнитотвердого (магнитного) материала. Шаговые двигатели с магнитным ротором позволяют получать больший крутящий момент и обеспечивают фиксацию ротора при обесточенных обмотках.

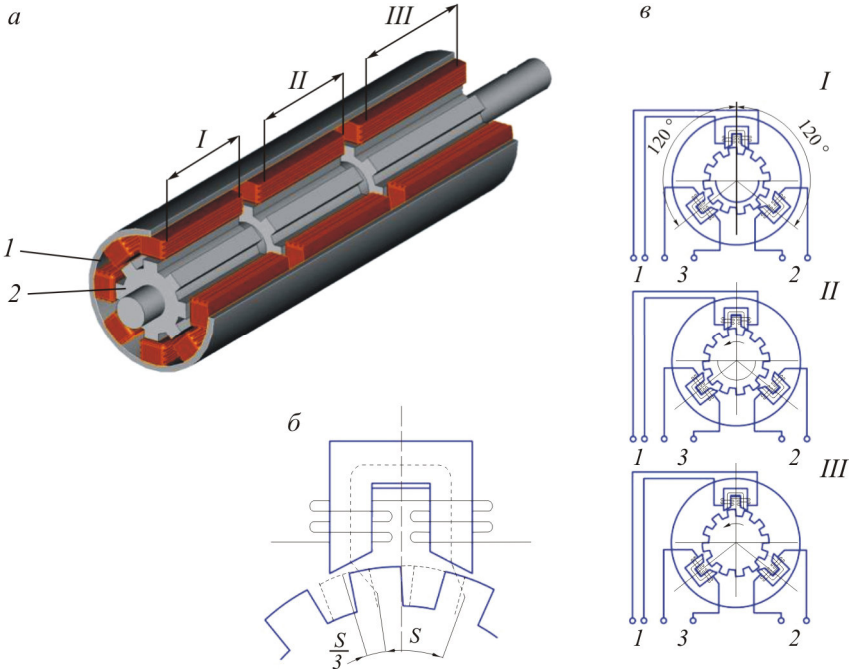


Рис. 10. Шаговый двигатель: *а* – устройство; *б*, *в* – схема действия

На рис. 10 приведена схема трехфазного шагового двигателя. Он состоит из ротора *2* и статора *1* и имеет вдоль оси три секции (I, II и III, рис. 10, *а*). Полюсы ротора разделены на три секции *1*, *2*, *3*, но каждая из них смещена по окружности относительно рядом расположенной секции на 1/3 межполюсного расстояния. Если полюсы секции (I) ротора располагаются против полюсов статора, то полюсы

секции (II) ротора смещены относительно полюсов статора на 1/3, а полюсы секции (III) на 2/3 межполюсного расстояния *S* (рис. 10, *б* и *в*). При подаче напряжения в секцию (I) ротор будет неподвижен, так как в этом положении он имеет минимальное магнитное сопротивление. При подаче напряжения в секцию (II) ротор повернется против часовой стрелки на 1/3 межполюсного расстояния, и полюсы этой секции встанут против полюсов статора. При подаче напряжения в секцию (III) ротор снова повернется против часовой стрелки на 1/3 шага и т.д. Последовательная подача импульсов на обмотки электромагнитов статора соответствующих секций вызывает прерывистое (шаговое) вращение ротора.

В настоящее время существует достаточно много типов шаговых двигателей, разработаны и серийно выпускаются шаговые двигатели с большой частотой импульсов тока, они обеспечивают скорости подач более 5–10 м/мин.

Для увеличения крутящего момента шагового двигателя в приводе применяют гидравлический усилитель. Таким образом, увеличение крутящего момента происходит за счет использования энергии масляного потока от гидростанции. В станках с ЧПУ используют гидроусилители момента с шаговым электродвигателем и малоинерционным высокомоментным гидроприводом [3].

3.2. Линейные двигатели

Приводы подач современных металлообрабатывающих станков с ЧПУ построены по традиционной схеме. Так, в одном из типов станков (рис. 11) размерные перемещения рабочего органа (РО) осуществляются от шагового двигателя (ШД), питание которого выполняется через статорную обмотку (Ст). Поворот ротора *1* ШД с валом *2* через ременную передачу (шкив *3*, ремень *4*, шкив *5*) передается на ходовой винт *6*. Через шариковую гайку *7* (она скреплена с рабочим органом) вращение винта трансформируется в продольное перемещение РО. В более сложных передачах имеются и ременная передача, и зубчатый редуктор *8* [3].

Недостатки приведенных приводов с ШВП очевидны: большое количество промежуточных элементов от источника энергии до РО, громадная инерционность этих элементов, что заметно особенно

в крупных станках, наличие зазоров в передающих устройствах, трение в сопрягаемых деталях, температурные и упругие деформации практически всех передающих звеньев, износ сопрягаемых элементов при эксплуатации и потеря исходной точности, погрешности в шаге ходового винта и накопленная погрешность по длине и т.д.

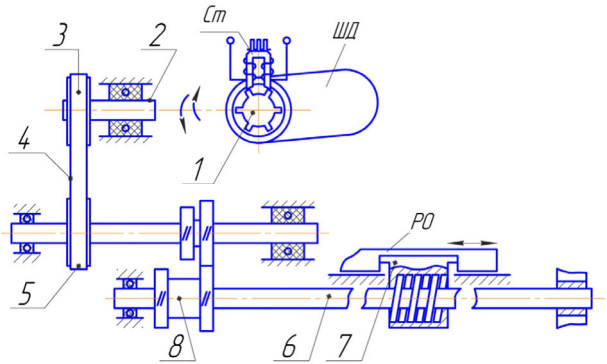


Рис. 11. Схема привода подач с использованием шаровинтовой пары (ШВП)

Применение в качестве приводов подач станков линейных двигателей (ЛД) вывело станкостроение на новый уровень, позволив исключить все недостатки приводов с ШВП.

Принцип линейного двигателя основывается на простейшей электромагнитной системе, состоящей из металлического сердечника-магнита *1* и статорной обмотки *2* (рис. 12, *а*). При подаче тока определенной полярности в обмотку сердечник сместится в ту или иную сторону, причем мгновенно. Изменение полярности сигнала на обмотку приведет к обратному ходу сердечника. Таким образом, от источника энергии к РО нет никаких промежуточных элементов, энергия передается через воздушный зазор [3].

Основными достоинствами линейных приводов являются: простота конструкции и применения, почти мгновенная остановка, мгновенный реверс, быстрота срабатывания, простота настройки.

Линейный двигатель состоит из двух элементов (рис. 12, *б*): неподвижного плоского статора Ст и плоского ротора Рот, скрепленного с рабочим органом РО, например с рабочим столом. И статор,

и ротор выполнены в виде плоских легко снимаемых блоков, которые болтами могут крепиться к любой поверхности.

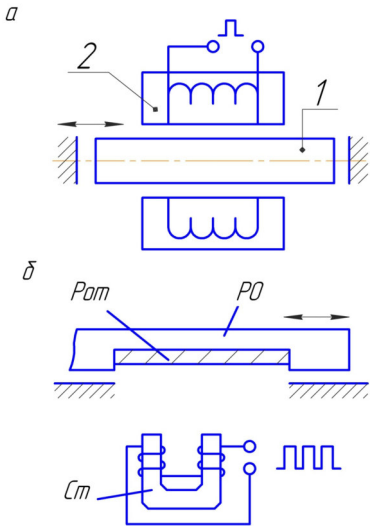


Рис. 12. Линейный двигатель:
а – исходная электромагнитная система;
б – принципиальная схема

Ротор (рис. 13) состоит из набора прямоугольных брусков *7*, исполненных как сильные постоянные магниты. Закреплены магниты определенным образом (с чередованием полюсов на внешней стороне) на тонкой плите *2* из специальной минералокерамики, коэффициент температурного расширения которой в два раза меньше чем у гранита, а твердость близка к твердости сапфира. Статор состоит из набора катушек *8* с сердечниками, подключенных к системе управления и к системе охлаждения.

В станке (см. рис. 13) статор *4* крепится несколькими болтами в окне вертикальной стойки *5*. В рассматриваемой модели примене-ны два статора. Они размещены по обе стороны шпинделя 1. К каж-дому статору крепятся два патрубка *3* системы охлаждения статора и кабель подвода энергии и управления.

Плита *2* ротора жестко соединена болтами с рабочим органом – подвижным шпинделем *1*. Поскольку в станке на каретку установлены два ЛД, то на каретке крепят, соответственно, и два ротора, каждый напротив своего статора. Система специальных направляющих и пневмопротивовес *9* обеспечивают исключительную легкость хода каретки, практически без усилий. Кожух *6* защищает элементы двигателя от загрязнения.

В рассматриваемом варианте использование керамики совместно с эффективной системой охлаждения решило многие проблемы ли-

нейных приводов, связанные с температурными факторами, сильными магнитными полями, жесткостью конструкции и т.п.

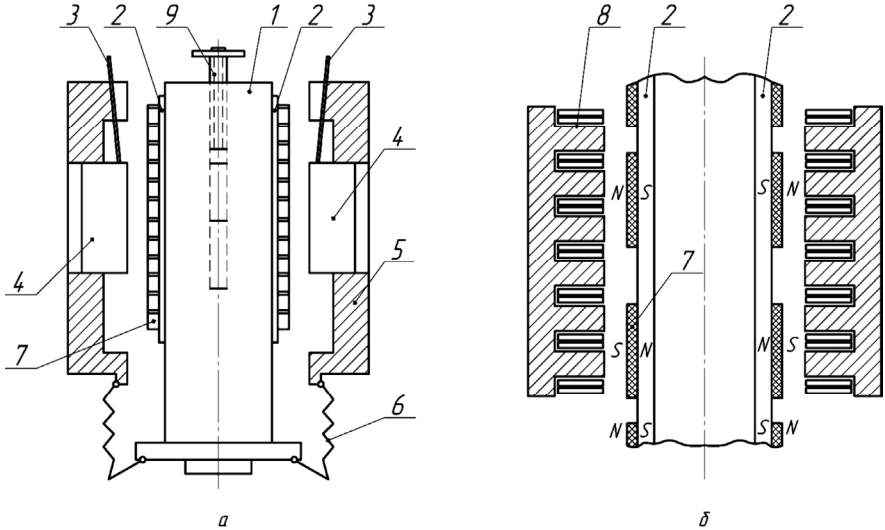


Рис. 13. Линейный двигатель как привод подач шпинделя ЭЭ-станка

Современные линейные двигатели обладают ходом от 100 до 2220 мм, с максимальной скоростью перемещения РО до 180 м/мин, с ускорениями до 20*g*, при точности исполнения заданных перемещений равном 0,0001 мм. Нагрев ЛД при работе не превышает +2 °С от температуры помещения. При этом обеспечивается почти мгновенная остановка РО, реверс, моментальная реакция привода на команды системы ЧПУ и т.д. На одном и том же рабочем органе может быть смонтировано несколько линейных двигателей [3].

3.3. Система очистки и подачи рабочей жидкости в зону обработки

С целью обеспечения высокой производительности, повышения точности и улучшения качества обработанной поверхности размерную электроэрозионную обработку целесообразно осуществлять при прокачке рабочей жидкости через межэлектродный промежуток. С этой целью станки оснащаются специальной гидравлической системой, схема которой приведена на рис. 14.

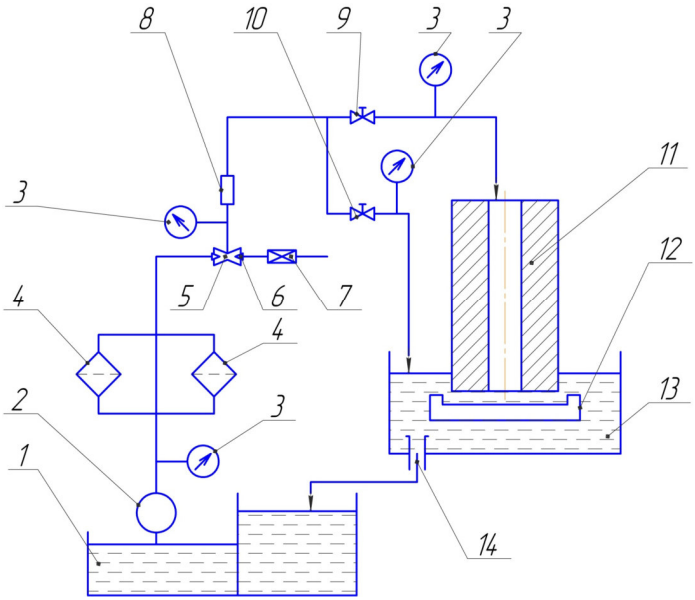


Рис. 14.Принципиальная схема гидравлической системы для прокачки рабочей жидкости: *1* – бак; *2* – насос; *3* – манометры; *4* – фильтры; *5* – регулятор расхода жидкости; *6* – заслонка; *7* – преобразователь положения заслонки; *8* – ротаметр; *9* и *10* – краны; *11* – полый электрод-инструмент; *12* – обрабатываемая деталь; *13* – рабочая волна; *14* – сливное отверстие

Бак *1* представляет собой емкость, состоящую из нескольких секций, в которых происходит отстаивание жидкости. Секции разделены перегородками, через которые жидкость попадает методом перелива из одной секции в другую.

Рабочая ванна *13* является частью силовой схемы станка. От ее конструкции зависит время установки и снятия заготовки, удобство обслуживания оборудования. В мелких станциях ванна неподвижно закрепляется на столе, а рабочая жидкость периодически сливается в бак. При этом установка и снятие заготовки производится без жидкости, что увеличивает вспомогательное время выполнения операции. В крупных станках ванна постоянно заполнена рабочей жидкостью и может подниматься и опускаться. Это облегчает установку детали и сокращает вспомогательное время. Известны конструкции

ванн, в которых предусмотрены откидывающиеся или съемные передние стенки, облегчающие доступ к заготовке во время ее установки и снятия.

Насос *2*, как правило, центробежного типа, который в наименьшей степени подвержен износу. Поскольку при электроэрозионной обработке в большинстве случаев не требуется высоких давлений жидкости в зоне обработки, применяются центробежные помпы общепромышленного назначения с напором 5–10 м и расходом 2–18 л/мин.

В тех случаях, когда необходимо обеспечить высокое давление рабочей жидкости (0,5–2,5 МПа), используют шестеренчатые насосы.

Фильтры предназначены для очистки рабочей жидкости от продуктов обработки. Обычно последовательно устанавливают фильтр грубой очистки и тонкой очистки. При обработке на небольших станках, когда съем металла незначителен (до 400–500 г в смену), используют фильтры с бумажными элементами, которые, в зависимости от напора рабочей жидкости, устанавливаются по несколько штук в пакете. Находят широкое применение намывные фильтры, в которых используются вспомогательные фильтрующие вещества. Они представляют собой мелкопористые частицы с большой активной поверхностью, на которой происходит осаждение шлама, образующегося в процессе обработки. Кроме того, используются также магнитные, сетчатые фильтры, центрифуги, сепараторы, гидроциклоны.

Устройство для регулирования расхода *5* рабочей жидкости предназначено для изменения гидравлического режима обработки по командам от адаптивного устройства управления. В рассматриваемой системе (см. рис. 14) такое устройство выполнено в виде эжектора. Путем использования в одной магистрали подачи рабочей жидкости нескольких регуляторов расхода можно задавать различные комбинации режимов их работы, обеспечивая тем самым различные направления потока и расхода рабочей жидкости. Так, при отведенной заслонке *6* жидкость отсасывается из межэлектродного промежутка, а при закрытой заслонке *6* она прокачивается через него. Таким образом, регулируя с помощью преобразователя *7* положение заслонки *6*, можно управлять расходом рабочей жидкости, проходящей через межэлектродный промежуток [13].

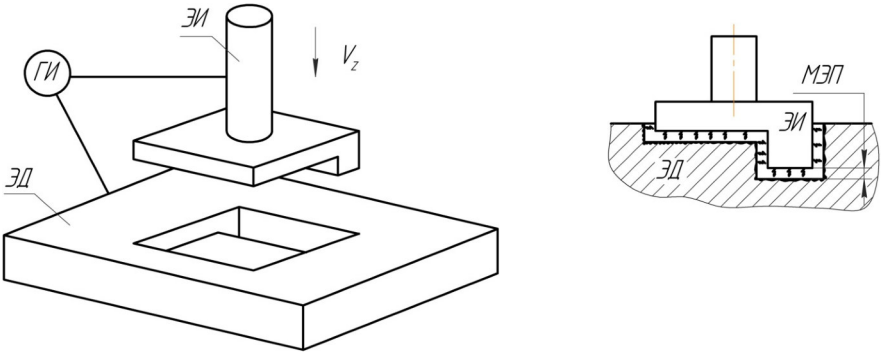
ТИПЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В зависимости от используемого электрода-инструмента (ЭИ) электроэрозионные станки можно разделить на проволочно-вырезные (ЭИ – проволока) и копировально-прошивные (ЭИ – объемный профильный элемент). Отдельную группу представляют станки для электроконтактной обработки на воздухе и установки для упрочнения и легирования.

1. Копировально-прошивочные станки

Копировально-прошивочные станки предназначены для получения в заготовках отверстий, полостей и углублений разной формы. Помимо обработки полостей и получения отверстий различной формы, копировально-прошивочные станки используются для нанесения на заготовки различных надписей.

В копировально-прошивочных станках объемному профильному ЭИ придается поступательное движение со скоростью V_z по направлению к ЭД (рис. 1, *а*) [3].



а *б*

Рис. 1. Схема копировально-прошивной обработки

От генератора ГИ к электроду-инструменту и к заготовке (ЭД) подаются электрические импульсы. Между ЭИ и заготовкой при ЭЭО все-гда существует зазор – межэлектродный промежуток (рис. 1, *б*).

В разных местах МЭП между поверхностями электрода-инструмента и электрода-детали имеются наименьшие расстояния (перпендикулярные к направлению подачи) между выступами микронеровностей профиля поверхностей ЭИ и ЭД. Эти расстояния в рассматриваемом месте и определяют как межэлектродный зазор (МЭЗ), поскольку между этими выступами и происходит разряд импульса тока и в зоне выступов удаляется материал [3].

В процессе копировально-прошивной электроэрозионной обработки ЭД и ЭИ погружены в среду углеводородной рабочей жидкости (РЖ). Простейшим вариантом РЖ является керосин с добавкой машинного масла. РЖ заливается в бак для рабочей жидкости и поддерживается в нем на постоянном уровне. В процессе обработки РЖ непрерывно очищается и охлаждается.

Для того чтобы процесс ЭЭО проходил стабильно, необходимо обеспечить процесс прокачки рабочей зоны для удаления шлама. Схемы прокачки достаточно разнообразны и в ряде случаев сложны, поскольку от уровня процесса прокачки во многом зависят качественные характеристики ЭЭ-процесса в целом [3]. В одном из вариантов (рис. 2) РЖ под давлением подается через полость ЭИ в зону обработки.

Для надежного удаления шлама и лучшей очистки зоны обработки в процессе ЭЭО электроду-инструменту придается, помимо поступательного движения, возвратно-поступательное движение с определенной частотой. Амплитуда хода при этом может задаваться различной и быть значительной, вплоть до выхода ЭИ полностью из

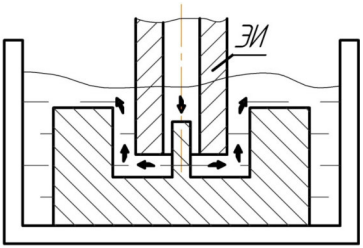


Рис. 2. Схема прокачки РЖ через отверстие в ЭИ заготовки.

Схема прокачки, представленная на рис. 3, является одной из наиболее неудачных схем.

При малых зазорах и увеличенных глубинах прошивки прокачка зоны обработки недостаточна, что отрицательно сказывается на процессе из-за плохого вывода шлама из МЭЗ. При определенном загряз-

нении зоны шламом процесс ЭЭО может прекратиться вообще. Но эта схема наиболее проста и не требует дополнительных работ по изготовлению электродов или приспособлений для установки заготовки. Остальные схемы имеют свои преимущества и недостатки и применяются в зависимости от условий производства, размеров ЭИ и заготовок, задач ЭЭО и др.

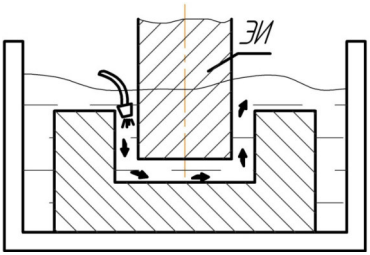


Рис. 3. Схема прокачки РЖ струей в зазор

На рис. 4 приведена схема копировально-прошивочного станка. На станине *1* смонтирован рабочий стол *2*, на котором закрепляется заготовка. Обработка осуществляется в ванне *3*, заполненной рабочей жидкостью. Электрод-инструмент *18* закрепляется в электрододержателе *8* и с помощью кареток *5* и *9* перемещается в двух взаимно перпендикулярных направлениях в горизонтальной плоскости. Электрод-инструмент *18* колеблется и поступательно перемещается к заготовке по сигналам блока управления, который приводит в действие шаровинтовой привод *6* и вибратор *7*, закрепленный на площадке *4*. Стол и электрод-инструмент изолированы от станины станка диэлектрическими прокладками *17*. Электрическая часть станка включает в себя генератор импульсов *10*, блок управления *11* с приборами контроля режимов обработки. Рабочая жидкость подается в межэлектродный промежуток из бака *14* через магистраль *12*. Насос *15* может подавать жидкость непосредственно в ванну 3 по магистрали *13*. Для слива жидкости в бак *14* используется магистраль *16*. Перемещение по осям *X* и *Y* осуществляется при помощи приводов *19* и *20* после поступления на них сигнала от блока управления.

В зависимости от массы обрабатываемых заготовок применяются прошивочные станки различных типоразмеров и с различной мощностью.

Для обработки заготовок массой свыше 100 кг применяются прошивочные станки, имеющие станины портального типа, что обеспечивает их большую жесткость. На них можно обрабатывать заготовки

с размерами до нескольких сот миллиметров, а перемещение шпинделя может достигать двух метров.

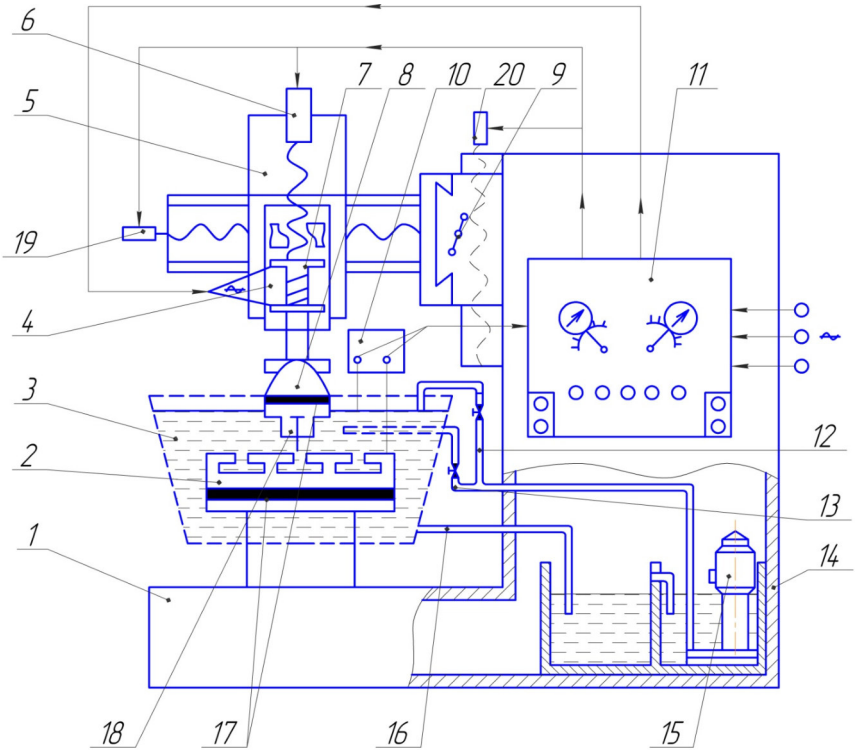


Рис. 4. Схема электроэрозионного копировально-прошивного станка: *1* – станина; *2* – рабочий стол; *3* – ванна; *4* – площадка; *5* и *9* – каретки; *6*, *19* и *20* – привода движений; *7* – вибратор; *8* –электрододержатель; *10* – генератор импульсов; *11* – блок управления; *12*, *13* и *16* – магистрали для прохождения рабочей жидкости; *14* –бак для рабочей жидкости; *15* – насос; *17* – диэлектрическая прокладка; *18* – электрод-инструмент

Значительную группу прошивочных станков составляют специальные станки. К такому оборудованию относятся станки для прошивания отверстий малого диаметра, а также крупные электроэрозионные станки, предназначенные для обработки заготовок массой до 20 т электродом-инструментом массой до 8 т [13].

Специальные станки для электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра носят название «Супердрели». Принцип обработки – это электроэрозионная прошивка, в которой электродом служат латунные трубки диаметром от 0,080 до 6 мм (рис. 3.5, *а*).

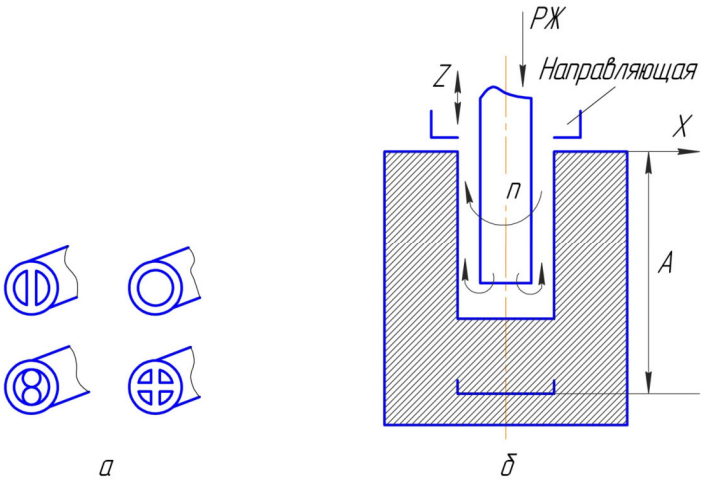


Рис. 5. Электроэрозионная обработка отверстий
на станках «Супердрель»: *а* – электроды; *б* – схема обработки

Профиль сечения зависит от диаметра трубки. Через электрод-трубку во время работы под давлением (до 80 МПа) прокачивается специальная РЖ (либо негорючий диэлектрик на водяной основе или углеводородная РЖ). Электроду при обработке придается вращение и осевая подача (рис. 5, *б*). «Супердрели» позволяют получать отверстия значительно быстрее традиционных методов, а также «сверлить» там, где получение отверстий в твердых металлах механическими способами практически невозможно [3].

2. Проволочно-вырезные станки

Основателями метода проволочно-вырезной электроэрозионной обработки считаются ученые Б.И. Ставицкий, М.М. Федоров, Е.В. Холоднов [14].

Данные станки получили широкое распространение по всему миру. Поскольку в качестве электрода-инструмента используется проволока, данные станки могут, подобно лобзику, вырезать детали любого профиля (рис. 6). Материалом электрода-инструмента, как правило, служит латунная или вольфрамовая проволока диаметром от 0,020 до 0,35. Проволока постоянно протягивается (сматывается) относительно заготовки с определенной скоростью $V_{пров}$ (м/мин). Скорость протягивания проволоки оказывает влияние на качество обработанной поверхности [12].

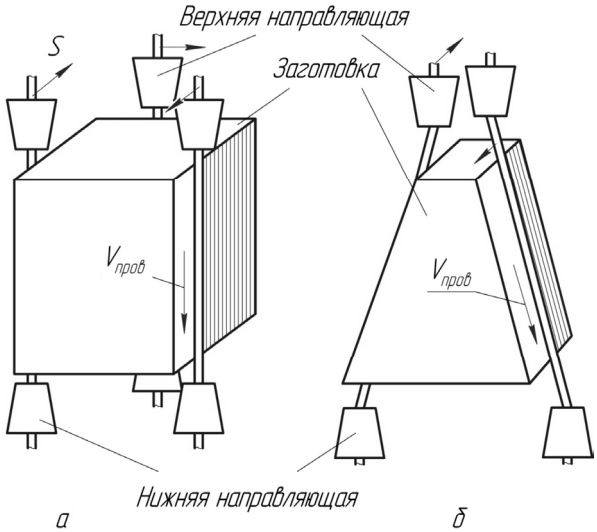


Рис. 6. Схема проволочно-вырезной ЭЭ-обработки
(*S* – направление подачи): *а* – прямой рез (цилиндрический);
б – угловой рез (резка на конус)

На рис. 6. показаны схемы проволочно-вырезной ЭЭ-обработки. При резке заготовок на конус задействуются приводы по-дач U и V, которые предназначены для смещения верхней направ-ляющей (рис. 7).

Типовые проволочно-вырезные станки (см. рис. 7) имеют два направляющих сопла – верхнее и нижнее. Нижняя направляющая находится в нижней части станка и является неподвижной. Верхняя

направляющая находится в верхней головке подвижной каретки, которая может перемещаться по двум осям *U* и *V*. Перемещение верхней каретки с направляющей по оси *Z* осуществляется при помощи шаровинтового привода (на рис. не показано). Через направляющие проходит проволока, которая при работе станка перематывается с заданной скоростью с катушки в ящик для сбора проволоки. Многие современные станки используют многоразовую проволоку, которая сматывается в ходе работы с подающей катушки на приемную. К проволоке и заготовке от генератора импульсов подаются импульсы электрического тока, которые и обеспечивают процесс электроэрозионной обработки.

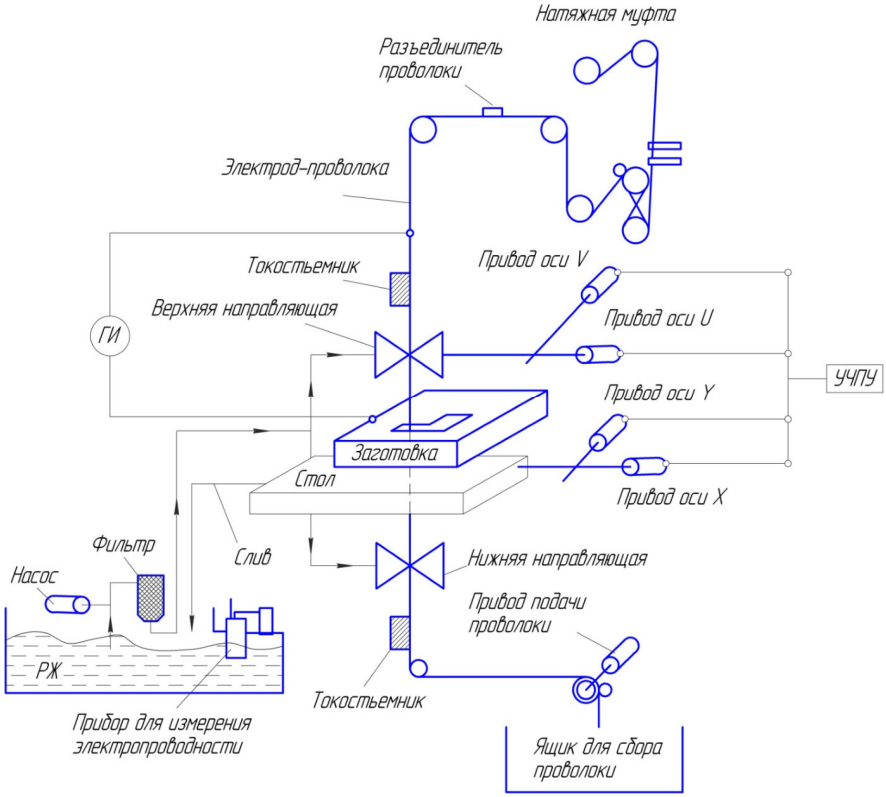


Рис. 7. Схема проволочно-вырезного электроэрозионного станка

При работе на проволочно-вырезном электроэрозионном станке заготовка закрепляется на рабочем столе, и импульсы электрического тока подаются непосредственно к столу. Однако при загрязнении рабочего стола (ржавчина) электрические импульсы могут не доходить до заготовки, в результате чего процесс обработки будет нестабилен, или не будет протекать вообще. На некоторых станках между заготовкой и столом прокладывают изоляционную прокладку. Таким образом, стол получается полностью электрически изолирован от детали. Импульсы тока подаются напрямую на деталь, обеспечивая тем самым стабильную обработку. Привода подач, управляемые от УЧПУ, обеспечивают перемещение стола с заготовкой по осям *X* и *Y* в соответствии с управляющей программой. При обработке сложных контуров, в том числе и резка на конус, совместно с приводами *X* и *Y* работают привода осей *U* и *V*.

Работа на проволочно-вырезном электроэрозионном станке может проводиться в условиях, когда стол с заготовкой находится в ванне с рабочей жидкостью (обычно в воде) или выполняется струйная прокачка зоны обработки через размещаемые рядом с направляющими втулками сопла.

В станках со струйной подачей (как на рис. 7) рабочая жид-кость струей под давлением подается в зону обработки, охлаждая деталь и вымывая образующийся шлам. Такие станки проще по кон-струкции, но у них возникают определенные проблемы с отводом тепла не только из зоны обработки, но и от заготовки в целом. Кроме того, имеют место сложности с промывкой от шлама узких пазов от реза у высоких заготовок. Поэтому возрастают тепловые деформации заготовок при обработке, понижается точность обработки, возможны ограничения высоты заготовок для обработки и др.

В станках, где заготовка при обработке погружается в бак, заполненный РЖ, температурные деформации минимальны. Струйная прокачка зоны обработки, убирая шлам, дополняет эффект теплоотвода. Укажем, что в современных станках РЖ при работе станка не только подвергается очистке, но и принудительному охлаждению при наличии системы поддерживания заданной температуры РЖ с высокой точностью.

Естественно, станки с системой погружной обработки более сложны по конструкции: имеют бак, как дополнительный элемент, развитую систему подачи – отвода РЖ, устройства контроля уровня РЖ в баке и температурной стабилизации РЖ, устройства уплотнения и др.

В станках с комбинированной системой обработки возможна работа как с полностью погруженной в РЖ заготовкой, так и со струйной подачей РЖ. Последнее применяется, когда заготовка по одному из размеров не может быть размещена в баке. Естественно, что ЭЭ станки с комбинированной системой наиболее предпочтительны в условиях производства.

Система отвода проволоки у проволочо-вырезных электроэрозионных станков бывает в основном двух типов. К первому типу относятся системы, когда проволока наматывается на приемную катушку, предварительно пройдя ряд шкивов (см. рис. 7). Данная система обладает рядом существенных недостатков. При обрыве проволоки появляется проблема заправки проволоки на приемную катушку, при этом теряется не только время, но и куски проволоки, протягиваемые на заправку.

Ко второму типу относятся системы ленточного отвода отработанной проволоки. Данные системы достаточно надежны, но после износа требуется замена лент, что вызывает дополнительные расходы на эксплуатацию стана [3].

Одним из проблемных элементов проволочно-вырезных электроэрозионных станков являются направляющие втулки для проволоки. Направляющие служат для центрирования и направления проволоки во время работы станка и во многом определяют точность его работы. В современных моделях станков применяются две основные конструкции – призматическая и фильерная. В призматической конструкции (рис. 8, *а*) проволока базируется плоскостями призмы с поджимом планкой с открытой стороны призмы.

Материал призмы – износостойкие твердые сплавы. Считается, что с износом направляющей контакт проволоки с плоскостями призмы сохраняется и положение проволоки в направлении, перпендикулярном оси призмы, остается неизменным. Но (по закону бази-

рования цилиндра на призму) имеет место (рис. 8, *в*) увеличенное смещение оси проволоки в направлении оси призмы (для призмы с углом 90° это смещение $\delta = 0,71\alpha$, где α – диаметральное отклонение от базового цилиндра). Так, можно предположить, что при колебании диаметра проволоки в 1 мкм неизбежно возникнут периодические погрешности (в плоскости оси призмы), равные 0,71 мкм. По мере износа призмы эти погрешности будут увеличиваться (с учетом износа призмы) и ось проволоки (относительно исходного положения) будет постоянно смещаться, что и внесет определенные погрешности в общую погрешность обработки (при всех движениях, соответствующих направлению оси призмы).

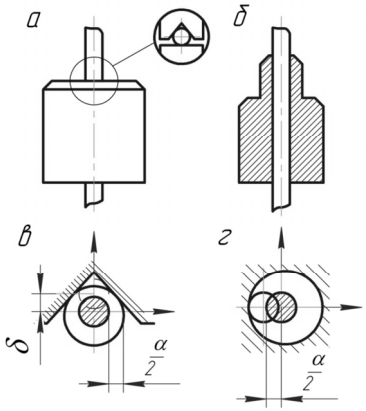


Рис. 8. Схема конструкций направляющих для проволоки

Фильерные направляющие изготавливают как обычные втулки (рис. 3.8, *б*), но из сапфира или алмаза, что обеспечивает длительный срок их службы (8000 ч и более). Втулки исполняют строго под заданный диаметр проволоки с минимальными допусками на базовое отверстие, которое должно обеспечить свободное прохождение калиброванной проволоки. Естественно, что в отверстии втулки имеется гарантированный зазор, который и определяет смещение оси проволоки относительно оси отверстия втулки. Если принять допуск на диаметр калиброванной проволоки 1 мкм, а гарантированный зазор в отверстии втулки 2 мкм и допуск на диаметр 2 мкм, то осевое смещение оси проволоки относительно центра втулки не превысит ± 2,5 мкм. Естественно, данное условие выполняется для новых, не изношенных втулок. С износом втулки величина смещения увеличивается. Этот зазор и определит влияние базирования проволоки на общую погрешность обработки. При работе в одном направлении произойдет выбор радиального зазора между проволокой и отверстием втулки (рис. 8, *г*) и положение оси проволоки (относительно ус-

тановившегося) будет меняться лишь из-за колебаний в диаметре проволоки, т.е. влияние зазора на общую погрешность обработки будет сведена к минимуму [3].

РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА

1. Методика расчета

Проектирование и расчет электрода-инструмента является очень важной задачей. Правильно изготовленный электрод обеспечивает заданную точность электроэрозионной обработки.

При внедрении ЭИ в обрабатываемую заготовку между торцевыми и боковыми поверхностями электрода-инструмента и формируемой полости образуются соответственно торцевой $l_т$ и боковой $l_б$ зазоры. Величина зазоров зависит от угла наклона боковых поверхностей электрода-инструмента и обрабатываемой полости, режима обработки, материала электродов, глубины их внедрения в заготовку и от других факторов.

При горизонтальном расположении МЭП продукты эрозии будут концентрироваться у поверхности обрабатываемой заготовки, а при вертикальном его расположении – распределяться в МЭЗ. Следовательно, в обоих случаях фактическая величина МЭЗ (δ), которая может быть пробита электрическим разрядом, будет меньше $l_б$ на сумму размеров продуктов эрозии $\sum d_i$, расположенных в данном сечении:

$$\delta = l_б - \sum d_i .$$

При этом с ростом угла наклона боковых поверхностей в данном сечении увеличивается объем продуктов эрозии, что может привести к возникновению дополнительных разрядов. В этом случае с обрабатываемой поверхности будет снят большой слой металла [10].

Величины бокового и торцового зазоров при обработке твердосплавных и стальных заготовок представлены в табл. 1.

Стекольников Максим Владимирович
Тихонов Денис Александрович

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ СТАНКОВ

Методические указания к практическим работам

Ответственный за выпуск Стекольников М.В.
Оригинал-макет Стекольников М.В.

Подписано в печать _____
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать RISO.
Объем _____ Тираж _____ Заказ № _____

413100, Россия, Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17
ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.