

A. E. Mikheev, A. V. Girn, E. V. Vakhteev, A. A. Mikheev, I. V. Evkin

## TECHNOLOGY OF OVERCOATING OF DESIGN ELEMENTS OF SPACE VEHICLES WITH ANTIEROSIVE COATING

*In the article we describe overcoating of aluminium foil of AD mark with antierosive coating by microarc oxydation, along with modes of production of protective coating from aluminum oxide. Final tests of samples of covering under the influence of factors of operation are performed.*

*Keywords: antierosive coverings, microarc oxydation, final tests.*

© Михеев А. Е., Гирн А. В., Вахтеев Е. В., Михеев А. А., Евкин И. В., 2010

УДК 62-837

А. А. Фадеев, И. Я. Шестаков, О. Е. Артюкова

## КОНСТРУИРОВАНИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРООБРАБОТКИ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРИВОДА

*Представлены особенности конструирования исследовательской установки для электрообработки на основе линейного электродинамического привода. Рассмотрены особенности конструкции установки и основные технические характеристики, приведены примеры использования установки для отработки режимов различных технологических процессов.*

*Ключевые слова: исследовательская установка, электродинамический привод, электрообработка, привод подачи инструмента.*

Для проведения различных технологических процессов обработки деталей в машиностроительном и приборостроительном производствах используют различные электрохимические и электрофизические методы обработки. Приводы подач большинства современных металлообрабатывающих станков с ЧПУ, в том числе и электроэрозионных (ЭЭ), строятся по традиционной схеме (перемещения рабочего органа РО осуществляется от двигателя постоянного тока через ременную передачу на ходовой винт). Недостатки указанных видов приводов достаточно известны и очевидны: большое количество промежуточных элементов, громадная инерционность этих элементов, трение во множестве сопрягаемых деталей и др.

Одним из вариантов устранения этих недостатков является использование в качестве приводов подач станков линейного электродинамического двигателя.

Практическое использование линейных электродинамических двигателей началось с его традиционных областей применения: быстродействующие технологические устройства – привод электрода-инструмента в установках импульсной электрохимической и электроконтактной обработки. Линейный электродинамический привод наилучшим образом подходил для перемещения электрода-инструмента на каждый импульс технологического тока, следующего с частотой до 800 Гц.

Совмещение рабочего органа стационарных машин и ротора электродвигателя позволяет уменьшить массу и размеры машины (привода), исключить из электропривода преобразователь движения в виде редуктора или

другого передаточного механизма, улучшить условия теплоотдачи, охлаждения и вентиляции [1].

Сотрудниками СибГАУ была предложена конструкция привода подачи электрода-инструмента на основе линейного электродинамического вибропривода (рис. 1) [2; 3].

Разработка конструкции установки осуществлялась в несколько этапов. Расчет привода строился исходя из определения электромагнитной силы, необходимой для проведения процессов обработки.

Электромагнитная сила электродинамического привода, возникающая в результате взаимодействия тока подвижной катушки с магнитным полем электромагнита, определяется по известной формуле:

$$F = IBL, \quad (1)$$

где  $F$  – электромагнитная сила;  $I$  – ток в подвижной катушке;  $B$  – магнитная индукция электромагнита в рабочем зазоре, где расположена подвижная катушка;  $L$  – длина проводника подвижной катушки.

Для предложенного устройства электромагнитная сила определяется следующим образом:

$$F = IBk, \quad (2)$$

где  $k$  – конструктивный параметр привода, рассчитывается по выражению

$$k = \frac{\pi d N t}{L},$$

где  $d$  – средний диаметр подвижной катушки;  $N$  – число витков подвижной катушки;  $t$  – ширина рабочего зазора,

в котором расположена подвижная катушка;  $L$  – длина подвижной катушки.

Из формулы (2) следует, что при постоянной индукции в зазоре, электромагнитную силу можно мерить путем регулирования тока в подвижной катушке. Причем быстроедействие привода определяется скоростью изменения тока в подвижной катушке. При отсутствии магнитопровода в подвижной части привода, на рабочих частотах (100...200 Гц) активное сопротивление подвижной катушки значительно больше реактивного.

Наибольшее распространение получил в технике переменный синусоидальный ток. При подаче на подвижную катушку синусоидального напряжения ток будет изменяться по закону

$$i = I_m \sin(\omega\tau),$$

где  $i$  – мгновенное значение тока в катушке;  $I_m$  – амплитудное значение тока в катушке;  $\omega$  – угловая частота, которая определяется следующим выражением:

$$\omega = 2\pi f,$$

где  $f$  – частота переменного тока.

Уменьшением тока при разгоне, вследствие наводимой в подвижной катушке ЭДС самоиндукции, пренебрегаем, так как для предложенного устройства скорость идеального холостого хода на порядок и более превосходит реальные скорости перемещения.

При этом электромагнитная сила определяется по уравнению

$$F = I_m \sin(\omega\tau) Bk, \quad (4)$$

подвижная часть привода согласно этой силе будет перемещаться в соответствии с уравнением

$$mx'' + \beta x' = F, \quad (5)$$

где  $m$  – масса подвижной части привода;  $\beta$  – коэффициент трения, зависящий от скорости;  $x'$  – скорость подвижной части привода (первая производная от перемещения по времени);  $xI$  – ускорение подвижной части привода (вторая производная от перемещения по времени).

Силой тяжести пренебрегаем, так как при исключении магнитопровода из подвижной части привода, электромагнитная сила на порядок и более превосходит силу тяжести подвижной части.

При синусоидальном изменении электромагнитной силы перемещение ползуна будет проходить по закону

$$x = A \sin(\omega\tau), \quad (6)$$

где  $A$  – амплитуда перемещения ползуна. Из выражения (6) определится скорость  $x'$ :

$$x' = A\omega \cos(\omega\tau) \quad (7)$$

и ускорение  $xI$ :

$$x'' = -A\omega^2 \sin(\omega\tau). \quad (8)$$

Подставив (7), (8) в уравнение (5) получим

$$-mA\omega^2 \sin(\omega\tau) + \beta A\omega \cos(\omega\tau) = I_m \sin(\omega\tau) Bk. \quad (9)$$

Проанализируем полученное уравнение. Развиваемое приводом усилие расходуется на преодоление сил трения  $\beta A\omega \cos(\omega\tau)$  и ускорение подвижной системы  $-mA\omega^2 \sin(\omega\tau)$ . Учитывая, что рабочие частоты привода лежат в пределах от 20 до 400 Гц, делаем вывод: амплитуда ускорения силы на два порядка и более превосходит амплитуду сил трения:

$$mA\omega^2 \gg \beta A\omega. \quad (10)$$

Последнее условие позволяет упростить выражение (9) следующим образом:

$$-mA\omega^2 \sin(\omega\tau) \approx I_m \sin(\omega\tau) Bk. \quad (11)$$

Для практической оценки динамических характеристик привода достаточно знать зависимость рабочих характеристик (массы подвижной системы, амплитуды и частоты перемещения) от электрических и геометрических параметров электрической машины.

Для этого перепишем уравнение (11) для амплитудного значения перемещения:

$$mA\omega^2 \approx I_m Bk. \quad (12)$$

Из уравнения (12) следует, что в предложенном конструктивном решении привода амплитуда механических колебаний прямо пропорциональна амплитуде тока в подвижной катушке и обратно пропорциональна квадрату частоты, причем электрические и геометрические параметры привода, в диапазоне частот от 20 до 400 Гц, связаны с его динамическими характеристиками следующим соотношением:

$$LmAf^2 = 0,08I_m B d N t. \quad (13)$$

Из выражения (13) получаем формулу для определения ширины рабочего зазора:

$$t = \frac{LmAf^2}{0,08I_m B d N}, \quad (14)$$

где  $t$  – ширина рабочего зазора;  $L$  – длина подвижной катушки;  $m$  – масса ползуна, подвижной катушки и инструмента;  $A$  – амплитуда перемещения ползуна;  $I_m$  – амплитудное значение тока в подвижной катушке;  $B$  – магнитная индукция в рабочем зазоре;  $d$  – средний диаметр подвижной катушки;  $N$  – число витков подвижной катушки.

Выражение (14) подтверждено экспериментально при испытании опытной партии разработанных авторами линейных электродинамических приводов.

На основе вышеприведенных вычислений разработанная конструкция электродинамического привода (рис. 1) подачи инструмента, которая состоит из катушки 1, установленной в полости магнитопровода 2, осевого выступа 3. Между выступом 3 и катушкой 1 образуется зазор 4. Между магнитопроводом 2 и выступом 3 образован рабочий зазор 5, величиной  $\delta$  и шириной  $t$ . Полюс ползуна 6, установленный коаксиально выступу 3, имеет возможность перемещаться вдоль выступа 3 в зазорах 4 и 5. На наружной поверхности ползуна расположена катушка 7 и дополнительная катушка обратной связи 8, которые соединены с блоком управления приводом 9. Длина подвижной катушки 7 –  $L$ , ее средний диаметр  $d$ . Ползун 6 жестко соединен с инструментом 10. Вылет выступа 3 относительно торцевой поверхности магнитопровода 2 –  $\Delta$ .

Электродинамический привод подачи инструмента работает следующим образом. Неподвижная катушка 1 электромагнита через блок управления 9 подключается к источнику постоянного тока. Из блока 9 подается электрическое напряжение заданной величины и направления на подвижную катушку 7. На витки катушки, находящиеся в рабочем зазоре 5, действует электромагнитная сила,

вследствие чего ползун *б* движется по выступу *з*. Электрический сигнал с катушки обратной связи *д* подается в блок управления приводом. Направление и скорость движения ползуна *з*, соответственно, и инструмента *ио* зависит от величины и направления тока в подвижной катушке *ж*, массы ползуна, инструмента, подвижной катушки, магнитной индукции в рабочем зазоре *е*, среднего диаметра подвижной катушки *ж*, ее длины и числа витков этой катушки.

Экспериментально установлено, что в электродинамическом приводе вылет выступа относительно торцевой поверхности магнитопровода должен составлять 1,5...2 величины рабочего зазора. При соотношении менее 1,5 происходит уменьшение электромагнитной силы, действующей на ползун из-за рассеивания магнитных силовых линий. Если вылет выступа составляет более двух величин рабочего зазора, то электромагнитная сила практически не увеличивается, а масса и габариты привода возрастают.

На основе электродинамического вибропривода спроектирована исследовательская установка (рис. 2), которая представляет собой станину *1*, на которую крепятся следующие основные элементы: линейный электропривод *2* со штоком *3*, на который крепиться электрод-инструмент *4*, ванна с рабочей жидкостью (электролитом) *5*, в которой производится обработка детали, блок питания *б*, блок управления *7* установки. Питание установки осуществляется от сети переменного напряжения через блок питания обмоток привода и блока управления. Блок управления позволяет плавно регулировать частоту и амплитуду колебаний электрода-инструмента. Величину амплитуды также можно регулировать с помощью пружины *8*. Подача рабочего напряжения осуществляется на шины питания *9* и *10* и на электрод-инструмент *4*.

Краткие технические характеристики установки:

- напряжение питания – 220 В;
- мощность – 2,5 кВт;

- диапазон частот колебания электрода-инструмента – 0...600 Гц;
- амплитуда колебания электрода-инструмента – 1,5...2,0 мм;
- габаритные размеры (высота/длина/ширина) – 670/410/450 мм;
- масса – 65 кг.

Исследовательская установка позволяет исследовать процессы электроэрозионной и электрохимической обработки в водных растворах нейтральных солей.

При электрохимической полировке деталей (стали 12Х18Н10Т, 12Х13, латунь Л62, титановый сплав ОТ-4) в водном растворе с концентрацией нейтральных солей 150 г/л на данной установке было достигнуто снижение шероховатости с *Ra* 3,2 до *Ra* 0,2 на внутренних и наружных поверхностях деталей по биполярной схеме подключения электродов. Частота вибрации электрода инструмента составила от 10...100 Гц, амплитуда – до 1,5 мм [4; 5].

Установка позволяет проводить копировально-прошивочные операции на стальных заготовках с глубиной получаемых полостей до 10 мм с любым профилем отверстий (в экспериментах – стали ХВГ и 9ХС) на частотах вибрации от 0 до 50 Гц и амплитуде до 1,5 мм. Поверхность детали, находящаяся вблизи электрода-инструмента, во время обработки не подвергается электрохимическому растравливанию. При прошивке детали в режиме электромеханического сглаживания возможно получение шероховатости поверхности *Ra* 0,1. При обработке в воде с добавлением 2,5 г/л азотнокислого натрия наблюдается минимальное отклонение формы полостей от размеров электрода-инструмента  $\pm 0,025$  мм [6].

Для более эффективного перемешивания электролита (помимо вибрации электрода-инструмента) возможно использование традиционных методов (вращения детали, принудительной циркуляции электролита).

Дальнейшим этапом совершенствования конструкции исследовательской установки является создание системы

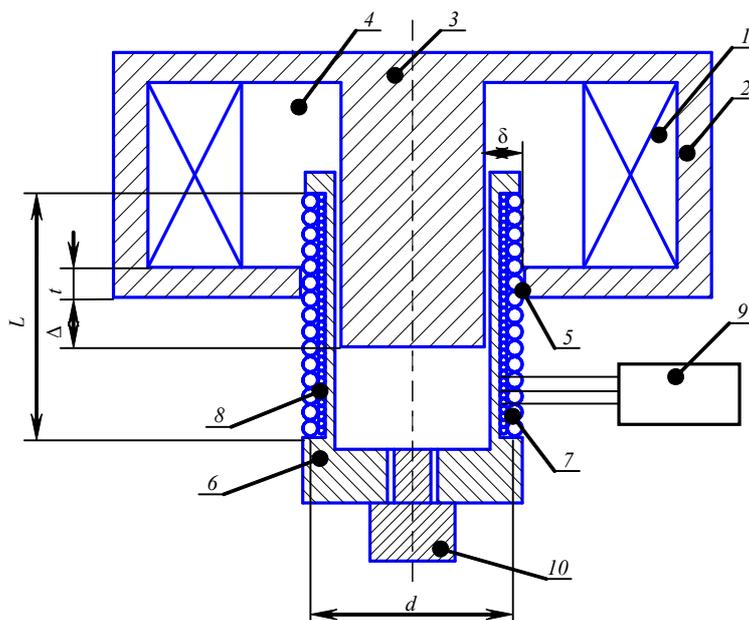


Рис. 1. Электродинамический привод

автоматизированного управления процессами электрообработки деталей.

Целями автоматизации является исследование процессов обработки и стабилизация технологических режимов. Главными требованиями, которым должна отвечать установка, являются:

- автоматизация управления и регулирования режимов работы линейного электродинамического привода и параметров обработки деталей в зависимости от требуемого качества поверхностей и точности обработки;

- регистрация технологических параметров обработки деталей и параметров работы привода установки.

Систему управления (рис. 3) можно разбить на два канала:

1. Канал управления режимами работы линейного привода. Включает в себя АЦП и ЦАП, которые обеспечивают передачу необходимых параметров работы привода (частоту, скважность, форму импульса, амплитуду и т. д.) на исполнительные устройства (усилитель – У) и обратную связь.

2. Канал управления технологическими параметрами обработки детали. Также включает АЦП и ЦАП, которые обеспечивают передачу и обратную связь параметров и режимов обработки детали (напряжение, технологический ток, частоту технологического тока) через регулятор мощности (РМ).

Преобразование и обработка информации производится в контроллере и выводится на панель индикации либо через интерфейсные модули – на персональный компьютер (ПК).

Приведенная система управления обеспечивает контроль технологических параметров обработки, а также режимов работы линейного электродинамического при-

вода, позволяет оценивать его техническое состояние. Помимо этого она обладает возможностью свободного наращивания функциональных возможностей при модернизации системы управления в зависимости от решаемых задач.

Таким образом, предлагаемый электродинамический привод имеет улучшенные массогабаритные характеристики, уменьшенные энергетические и материальные затраты, а также упрощенную конструкцию. Результаты показывают, что при заданной частоте и амплитуде перемещений инструмента предложенное техническое решение позволяет уменьшить массу привода на 20...22 %, снизить энергетические затраты на 15...18 % по сравнению с типовым электромагнитным линейным приводом.

Использование предлагаемой исследовательской установки на основе линейного электродинамического привода для решения задач электрообработки деталей показало определенные преимущества: высокую точность и качество обработки, низкое энергопотребление, простоту конструкции привода установки и реализации схемы обработки. Дальнейшая модернизация исследовательской установки позволит автоматизировать процесс управления установкой и обработки деталей, что, в свою очередь, позволит повысить качество обработки деталей, расширить функциональные возможности установки, поднять исследования процессов электрической обработки на новый уровень и как итог – после соответствующей доработки – внедрение на производстве.

#### Библиографические ссылки

1. Хромов Е. В. Линейный асинхронный двигатель в приводах стационарных машин с колебательным движе-

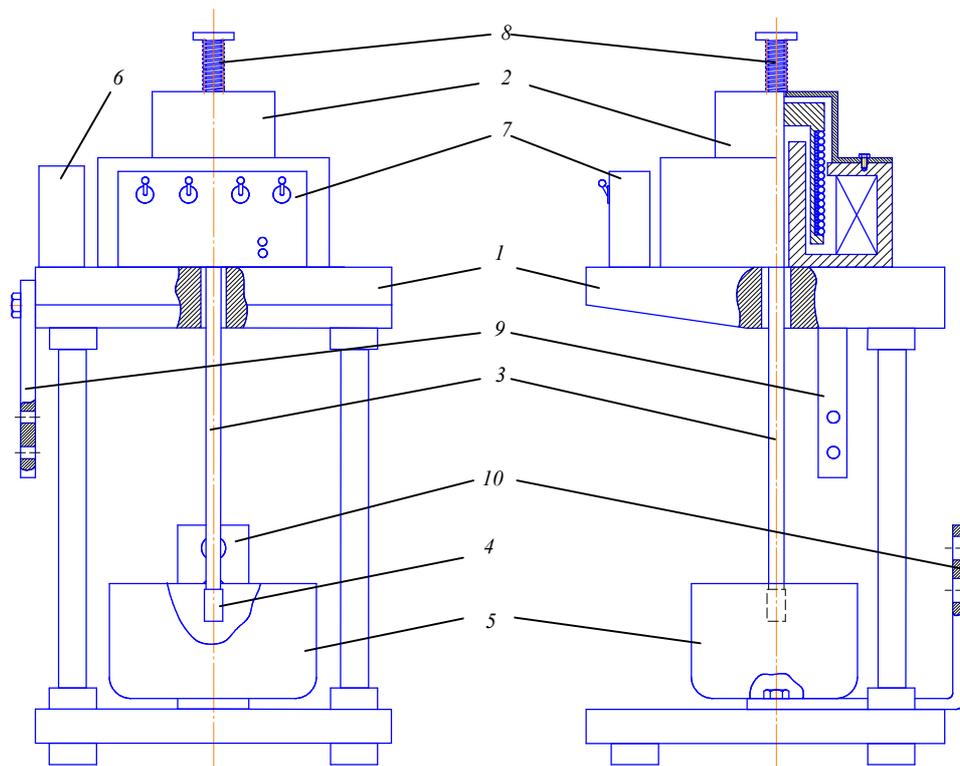


Рис. 2. Исследовательская установка

нием рабочих органов // Наука и современность – 2010 : сб. материалов III Междунар. науч.-практ. конф. : в 3 ч. Ч. 2 / под общ. ред. С. С. Чернова. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. С. 222–225

2. Пат. 2274525 РФ МПК В23Н 7/30 Электродинамический привод подачи инструмента / Стрюк А. И., Шестаков И. Я., Фадеев А. А. № 2004128716/02 ; заяв. 27.09.04 ; опубл. 20.04.06, Бюл. № 11.

3. Стрюк А. И., Шестаков И. Я. Установка электрообработки с линейным электродинамическим двигателем // Вестник СибГАУ. Красноярск, 2006. Вып. 3(10). С. 65–67.

4. Бабкина Л. А. Обеспечение параметров обработки деталей летательных аппаратов биполярным электрохимическим полированием : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08. Красноярск. 2010.

5. Пат. № 2229543, РФ МПК С25F 3/16. Способ электрохимического полирования / Шестаков И. Я., Бабкина Л. А. ; заяв. 15.07.02 ; опубл. 27.05.04, Бюл. № 15.

6. Стрюк А. И., Шестаков И. Я., Цуканов А. В. Импульсная электрообработка вибрирующим электродом-инструментом // Вестник СибГАУ. Красноярск, 2004. Вып. 5. С. 72–76.

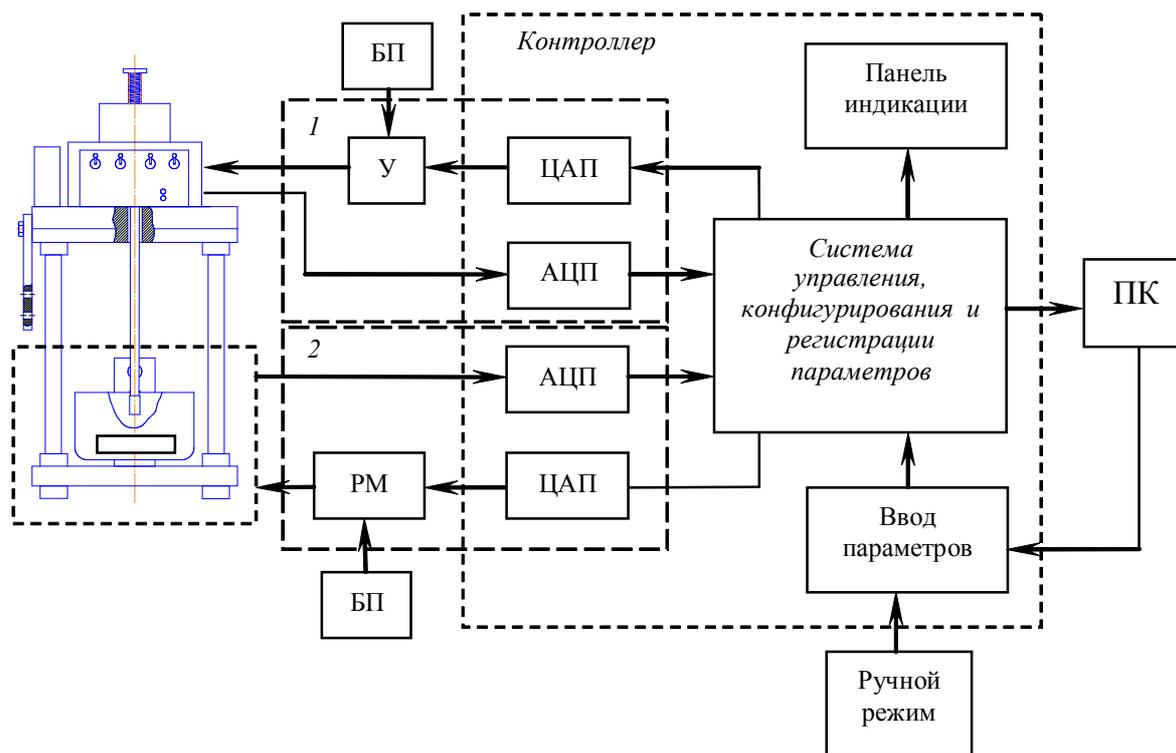


Рис. 3. Блок-схема системы управления электродинамического привода подачи инструмента:  
 У – усилитель; РМ – регулятор мощности; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь;  
 АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БП – блок питания; ПК – персональный компьютер

А. А. Fadejev, I. Ya. Chestakov, O. E. Artukova

## DESIGNING OF RESEARCH INSTALLATION FOR ELECTROPROCESSING ON THE BASIS OF ELECTRODYNAMIC DRIVE

The work presents features of designing of research installation for electroprocessing on the basis of a linear electrodynamic drive. Features of design of installation and the basic technical characteristics are considered and examples of use of the installation for development of modes of various technological processes are given.

Keywords: research installation, electrodynamic drive, electroprocessing, tool advance drive.

© Фадеев А. А., Шестаков И. Я., Артюкова О. Е., 2010