

# АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПРИВОД УПРАВЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА ДЛЯ УСТАНОВОК ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

С. В. ГУЛАКОВ, д-р техн. наук, В. В. БУРЛАКА, асп. (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Предложена конструкция механизма перемещения электрода для наплавки рабочих поверхностей деталей машин и инструмента валиками сложной формы с электронной системой автоматического управления. Устройство выполнено в виде модификации кривошипно-шатунного механизма, в котором шатун изготовлен с возможностью автоматического регулирования его длины.

*Ключевые слова:* электродуговая наплавка, привод колебания электрода, кривошипно-шатунный механизм, система автоматического управления

Для обеспечения качественного формирования наплавленного рабочего слоя со сложной траекторией на восстанавливаемой детали необходимо управление траекторией валика. Оно должно учитывать, в частности, резкое изменение траектории перемещения в вершинах, например, зигзагов (рис. 1), сопровождаемое возможным искажением формы сварочной ванны при перемене направления перемещения электрода.

Целью данной работы является разработка и исследование простого и надежного устройства колебания электрода, позволяющего формировать требуемую траекторию его перемещения.

В качестве базового устройства колебания электрода использован кривошипно-шатунный механизм (КШМ), обеспечивающий траекторию перемещения рабочего органа, близкую к синусоидальной. Изменение формируемой траектории в нем возможно путем управления приводным двигателем или изменения геометрических параметров элементов КШМ.

Формирование траектории движения путем управления приводным двигателем требует его частых реверсов и значительных ускорений, что приводит к перегревам и снижению надежности системы.

В работе предложен привод на основе КШМ, в котором шатун выполнен с возможностью программного регулирования его длины в процессе работы механизма [2] (рис. 2). При этом минимальная и максимальная длина шатуна определяют границы получающегося «коридора» допустимых положений рабочего органа (рис. 3, кривые  $L_{\max}$ ,  $L_{\min}$ ). Линейные параметры шатуна изменяются с помощью смонтированного на нем дополнительного привода. Таким образом, возможно формирование наплавленного валика любой

формы в пределах «коридора» допустимых положений, например, треугольной (рис. 3, кривая 1) или трапециевидальной (рис. 3, кривая 2).

Из рис. 2 следует, что координата  $y(\varphi)$  держателя электрода из геометрических соображений определяется как

$$y(\varphi_{\text{КШМ}}) = R \sin \varphi_{\text{КШМ}} + \sqrt{L(\varphi_{\text{КШМ}})^2 - (R \cos \varphi_{\text{КШМ}})^2}, \quad (1)$$

где  $R$  — длина кривошипа, м;  $\varphi_{\text{КШМ}}$  — угол поворота КШМ, град;  $L(\varphi_{\text{КШМ}})$  — длина шатуна, м.

Из выражения (1) видно, что, управляя в течение периода колебания (полного оборота кривошипа) длиной шатуна  $L$ , можно существенно влиять на закон перемещения держателя электрода.

Изменение длины шатуна  $L = f(\varphi)$  (рис. 2) обеспечивается системой автоматического управления (САУ) таким образом, чтобы траектория перемещения электрода  $y(\varphi)$  соответствовала заданной.

Так, для получения треугольной траектории перемещения электрода функция  $y(\varphi)$  может быть следующего вида:



Рис. 1. Поверхность валика с наплавленными валиками зигзагообразной формы



$$y(\varphi) = Y_0 + \frac{H}{2} \frac{2}{\pi} \arcsin(\sin(\varphi_{\text{КШМ}})), \quad (2)$$

где  $Y_0$  — смещение, м;  $H$  — размах колебаний, м.

Коэффициент  $2/\pi$  перед функцией арксинуса является нормированным. Смещение  $Y_0$  удобно выбирать равным

$$Y_0 = \frac{\sqrt{L_{\text{min}}^2 - R^2} + \sqrt{L_{\text{max}}^2 - R^2}}{2}, \quad (3)$$

что дает центрирование в «коридоре» допустимых положений.

Таким образом, для реализации треугольной траектории перемещения электрода длина шатуна КШМ должна изменяться таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$\begin{aligned} R \sin \varphi_{\text{КШМ}} + \sqrt{L(\varphi_{\text{КШМ}})^2 - (R \cos \varphi_{\text{КШМ}})^2} = \\ = Y_0 + \frac{H}{2} \frac{2}{\pi} \arcsin(\sin \varphi_{\text{КШМ}}). \end{aligned} \quad (4)$$

Решение уравнения (4) имеет вид

$$\begin{aligned} L(\varphi_{\text{КШМ}}) = \\ = \sqrt{\left[ Y_0 + \frac{H}{2} \frac{2}{\pi} \arcsin(\sin \varphi_{\text{КШМ}}) - R \sin \varphi_{\text{КШМ}} \right]^2 + (R \cos \varphi_{\text{КШМ}})^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Получение трапецеидальной траектории возможно путем модификации треугольного колебания следующим образом:

$$y(\varphi) = Y_0 + \frac{H}{\pi} \arcsin \left\{ \begin{aligned} & \left[ \frac{\pi}{2} - \gamma, \text{ если } \varphi \in \left[ \frac{\pi}{2} - \gamma; \frac{\pi}{2} + \gamma \right], \right. \\ & \left[ \frac{3\pi}{2} - \gamma, \text{ если } \varphi \in \left[ \frac{3\pi}{2} - \gamma; \frac{3\pi}{2} + \gamma \right], \right. \\ & \left. \varphi, \text{ если } \varphi \in (0; \frac{\pi}{2} - \gamma) \cup (\frac{\pi}{2} + \gamma; \frac{3\pi}{2} - \gamma) \cup (\frac{3\pi}{2} + \gamma; 2\pi), \right. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\gamma$  — половинная угловая ширина вершины трапеции.

При этом размах трапецеидального колебания  $H'$  и параметр  $\gamma$  связаны соотношением

$$H' = H \left( 1 - \frac{2\gamma}{\pi} \right). \quad (7)$$

САУ предложенным составным приводом перемещения электрода должна обеспечивать надежную работу, безошибочное продолжение работы после отключения и последующего восстановления питания, хорошие параметры качества, такие, как время регулирования и перерегулирование.

Составной привод перемещения электрода как объект управления, включающий КШМ с переменной длиной шатуна и двигатель постоянного тока, управляющий этой длиной, представляет собой достаточно сложную нелинейную систему с внутренними обратными связями.

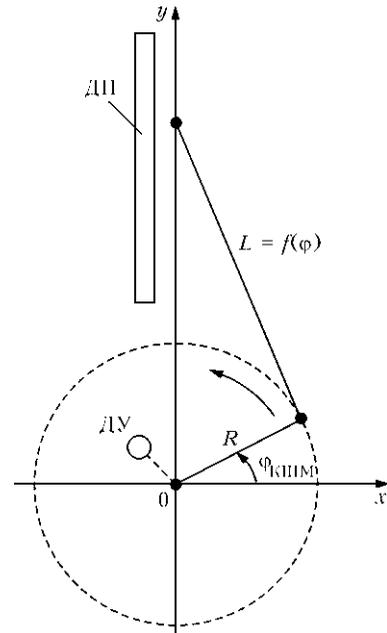


Рис. 2. Кинематическая схема привода: ДУ — датчик угла поворота кривошипа; ДП — датчик положения электрода

Параметром объекта управления, посредством которого возможно влияние на него со стороны САУ, является напряжение якоря. Последнее должно изменяться таким образом, чтобы координата держателя электрода  $X_{\text{вых}}$  изменялась по заданному закону. При этом из-за частых реверсов и ускорений двигателя вспомогательного привода необходимо обеспечить ограничение его тока якоря на безопасном уровне. Система также должна быть устойчива к самовозбуждению.

Реализация САУ в виде классического одноконтурного регулятора с общей отрицательной обратной связью по положению электрода приводит к неудовлетворительным параметрам качества регулирования, так как объект управления представляет собой инерционное звено второго поряд-

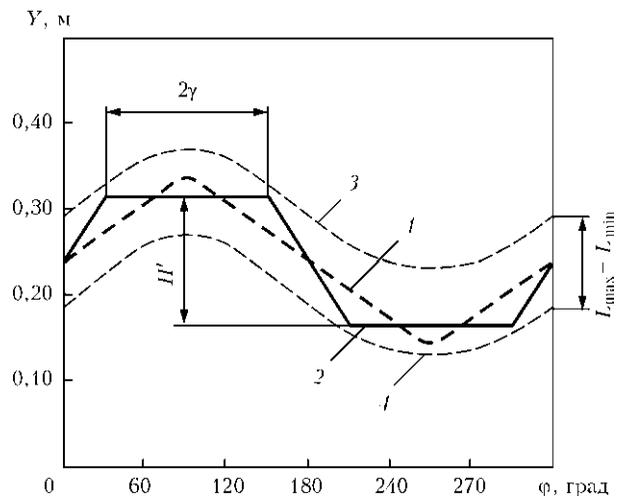


Рис. 3. Траектории КШМ: 1 — треугольная; 2 — трапецеидальная; 3, 4 — соответственно при предложенных длинах  $L_{\text{max}}$  и  $L_{\text{min}}$

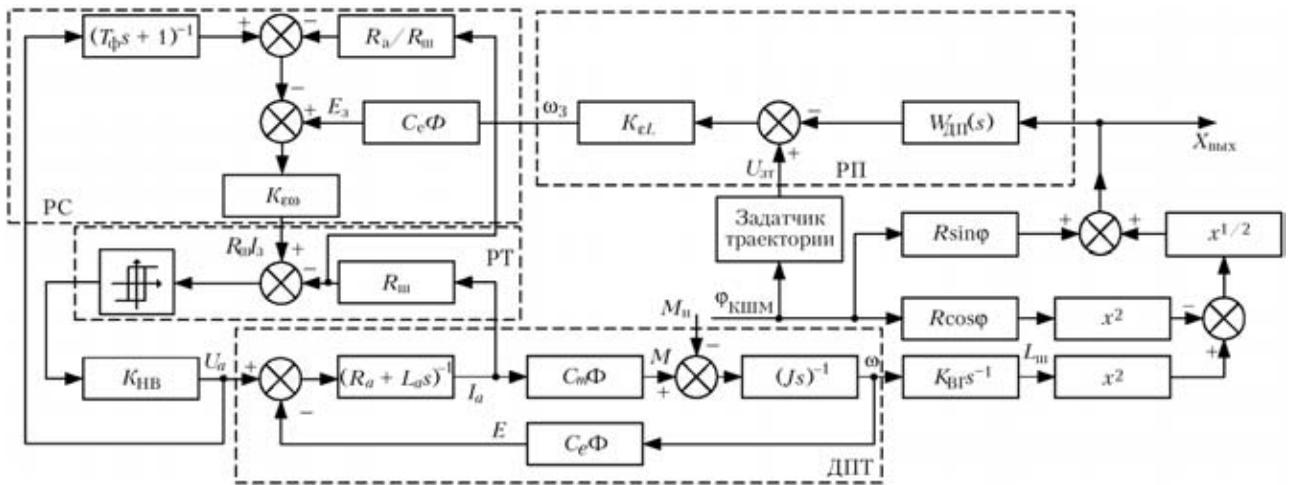


Рис. 4. Структурная схема системы управления механизмом колебания электрода

ка, что затрудняет стабилизацию замкнутой системы.

Улучшить параметры регулирования в одноконтурной схеме автоматического управления не представляется возможным из-за отсутствия информации о работе внутренних обратных связей в объекте управления.

Для облегчения синтеза САУ и обеспечения лучших характеристик регулирования применено разбиение всей системы управления на вложенные контуры с тем, чтобы иметь возможность их последовательной настройки и оптимизации. При этом отдельные контуры регулирования обеспечивают «развязывание» внутренних обратных связей в объекте управления, что дает возможность максимально снизить время регулирования, сохраняя при этом физические ограничения по напряжению и току якоря двигателя.

Система управления имеет три контура регулирования: регуляторы тока (РТ) якоря, скорости (РС) и положения (РП). Структурная схема системы управления приведена на рис. 4. Задачей каждого регулятора является максимально быстрая и точная обработка соответствующего задания. При этом возможна организация местных отрицательных обратных связей.

Формирование тока якоря двигателя вспомогательного привода обеспечивается импульсным гистерезисным регулятором, что предопределяет высокую скорость реакции системы и малые потери мощности в регуляторе.

Практическая реализация САУ выполнена на однокристальном микроконтроллере фирмы ATMEL ATmega168-20. Совмещение большинства функций регулирования на одном кристалле позволяет получить систему с возможностью гибкой настройки практически всех параметров регулятора. Кроме того, применение микромодулятора позволяет легко обеспечить диагностирование работы привода в реальном времени и с ми-

нимальным временем обнаруживать сбой в его работе.

Двигатель основного привода представляет собой двигатель постоянного тока с независимым возбуждением мощностью 230 Вт, номинальным напряжением якоря 110 В, током 2,9 А и номинальной скоростью вращения 2400 об/мин.

Во вспомогательном приводе выбран двигатель с возбуждением от постоянных магнитов типа ДП-40-40, что объясняется простотой управления (регулирование скорости вращения вала производится только изменением напряжения на якоре), малой инерционностью (электромеханическая постоянная времени порядка 300 мс), большим предельным моментом (порядка  $5 M_{\text{ном}}$ ), хорошими массогабаритными показателями и высоким отношением мощности к массе (40 Вт при массе 1,1 кг).

Режим работы двигателя в линейном приводе может быть классифицирован как повторно-кратковременный (S3 по ГОСТ 183-74), поскольку время цикла колебания (порядка 30 с) не превышает постоянной времени нагрева машины. Исходя из этого система управления допускает кратковременные пятикратные перегрузки двигателя в моменты реверса; при этом среднеквадратичный ток якоря, взятый за время цикла, не превышает номинального, что гарантирует отсутствие перегрева.

Для определения угла поворота кривошипа механизма перемещения применен сельсин, на обмотку статора которого подана симметричная трехфазная система напряжений. Электродвижущая сила обмотки ротора и напряжение одной из фаз подается на схему управления. Угол поворота определяется программно по сдвигу фазы между названными выше сигналами.

Положение колеблющейся платформы, на которой установлен механизм подачи электрода, определяется с помощью бесконтактного датчика Micropulse, выходной сигнал которого имеет пределы изменения (-15...+15) В и обновляется с частотой 2 кГц.

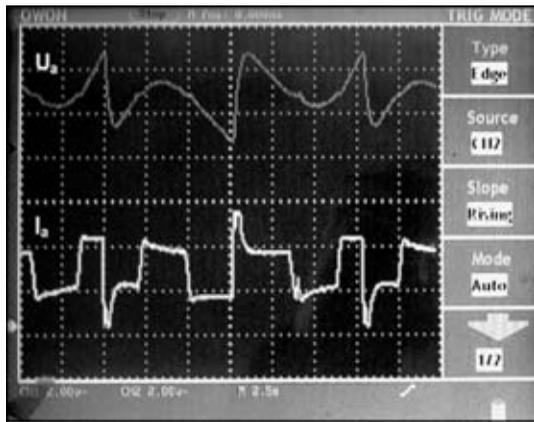


Рис. 5. Осциллограммы напряжения  $U_a$  и тока якоря  $I_a$  двигателя вспомогательного привода при отработке треугольной траектории перемещения электрода

Для интерактивной настройки параметров системы применен жидкокристаллический индикатор типа TIC154 в типовой схеме включения и четырехкнопочная клавиатура. Настройка производится с помощью иерархического меню.

Напряжения питания обоих двигателей формируются с помощью полумостовых инверторов, управляемых от контроллера и выполненных с применением транзисторов IRG4PC30UD и драйверов IRS2113 в типовой схеме включения. В схеме предусмотрена также возможность обмена данными с персональным компьютером посредством интерфейса RS-232 и возможность внутрисхемного перепрограммирования контроллера.

Применение составного привода позволяет изменять также амплитуду колебаний в процессе работы, что дает возможность проводить наплавку слоя с заданным распределением свойств, например, поверхности лунчатых валков [3].

Авторами выведена зависимость оптимальной длины кривошипа от амплитуды требуемой траектории колебаний, при которой от вспомогательного привода требуется минимальная мощность [4]. Это улучшает динамические характеристики системы (снижение момента инерции) путем предварительной настройки длины кривошипа перед началом цикла наплавки.

На рис. 5 приведены осциллограммы напряжения и тока якоря двигателя вспомогательного при-

вода при изменении длины шатуна при отработке треугольной траектории перемещения электрода с оптимально выбранной длиной кривошипа. Предложенная система управления приводом перемещения электрода имеет характеристики, позволяющие формировать оптимальную для наплавки траекторию перемещения.

В заключение следует отметить, что разработано электромеханическое устройство управления траекторией перемещения электрода, включающее КШМ, приводимый в движение мощным электроприводом, и устройство изменения длины шатуна, содержащее привод постоянного тока, установленный непосредственно на нем, и САУ, регулирующую по заданному закону геометрические параметры шатуна. Система выполнена с использованием микропроцессорной техники и обеспечивает минимизацию мощности устройства изменения длины шатуна путем предварительного выбора оптимальной длины кривошипа. Проверка устройства в лабораторных опытно-промышленных условиях показала высокие динамические характеристики (перерегулирование порядка 10 %, время регулирования 1,8 с при отработке ступенчатого воздействия) и достаточную (порядка 7 %) точность работы колебательного механизма.

Проведены испытания устойчивости данной системы к воздействию внешних возмущений с учетом реальных механических характеристик устройства и ограничений параметров (тока якоря и максимальной скорости). По результатам выполнена оптимизация параметров контуров регулирования САУ.

1. Гулаков С. В., Носовский Б. И. Наплавка рабочего слоя с регламентированным распределением свойств. — Мариуполь: ПГТУ, 2005. — 170 с.
2. Пат. 86294 Украина, МПК В23К 9/04. Привод перемещения электрода в наплавочной установке / С. В. Гулаков, В. В. Бурлака, І. С. Псарева. — Заявл. 24.07.2007; Опубл. 10.04.2009, Бюл. № 7.
3. А. с. 1403498 СССР. Устройство управления процессом наплавки зигзагообразного шва / С. В. Гулаков, Б. И. Носовский. — Заявл. 28.10.86; Опубл. 15.04.88.
4. Управление процессом дуговой наплавки рабочего слоя валиками зигзагообразной формы / С. В. Гулаков, В. В. Бурлака, І. С. Псарева, А. В. Ярыза-Стеценко // Захист металургійних машин від поломок. — 2006. — Вип. 9. — С. 202–207.

Suggested is the design of the electrode movement mechanism for deposition of complex-configuration beads on working surfaces of machine parts and tools by using the automatic electron control system. The device is a modification of the connecting rod gear, in which the connecting rod is made with a possibility of automatic adjustment of its length.

Поступила в редакцию 31.08.2010