

Список литературы

1. Бахвалов Ю. А., Зарифян А. А., Кашиков В. Н., Колпакчян П. Г., Плохов Е. М., Янов В. П. Моделирование электромеханической системы электровоза с асинхронным тяговым приводом / Под ред. Е. М. Плохова. М.: Транспорт, 2001. 286 с.
2. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: Учебное пособие. СПб.: КОРОНА прнт, 2001. 320 с.
3. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
4. Гейзер А. И. Трамвайные вагоны моделей 71-402 и 71-403 с асинхронным приводом производства ФГУП "Уралтрансмаш" // Транспорт Урала. 2005. № 2 (5). С. 46–51.
5. Safin A. R. Selection of Efficient Control Circuits for a Tram Traction Electric Drive on the Basis of Development of a Simulation Model. Russian Electrical Engineering // Allerton Press. 2013. V. 84, № 1. P. 57–61.

A. R. Safin, Associate Professor, sarkazan@bk.ru, **R. S. Misbakhov**, Associate Professor, **V. M. Gureev**, Full Professor, Kazan State Power Engineering University

Development of a Rational Structure of Traction Electric Tram in the Simulation Environment of Electric Power Facilities Program MATLAB

We considered the development of a simulation model of tram traction drive with induction motors. Development of a simulation model is executed with the help of the program "Matlab" and SimPowerSystem application. The proposed model allows to calculate the energy performance traction for an electric tram.

SimPowerSystems, as part of Simulink, is considered one of the best packages for the simulation of electrical devices and systems. The purpose of the simulation model is to find out the rational structure of a traction drive with a minimal loss of electricity in a traction inverter and traction motor.

The problem of modeling is to analyze the energy losses in a traction inverter tram in a traction engine cooling system taking into account the different traffic conditions, element base of an inverter and control methods.

Application of this model will allow to assess parameters of the traction converter (type of semiconductor elements, circuits of ripple voltage reduction etc.), to compare different control algorithms depending on the load of the rolling stock, track profile, and speed.

Improvement and validation of this model is carried out together with colleagues from Traffic control systems department of the Technical University of Dresden, with the purpose of introduction of electric rolling motion simulator, based on MATLAB software package.

Keywords: traction, traction inverter, tram, simulation model, energy losses

References

1. Bakhvalov Yu. A., Zarifyan A. A., Kashnikov V. N., Kolpakhchyan P. G., Plokhot E. M., Yanov V. P. Modelirovaniye elektromekhanicheskoy sistemy elektrovozova s asinkhronnym tyagovym privodom. Pod red. E. M. Plokhotova. M.: Transport, 2001. 286 p.
2. German-Galkin S. G. Komp'yuternoe modelirovaniye poluprovodnikovykh sistem v Matlab 6.0: Uchebnoe posobie. SPb.: KORONA print, 2001. 320 p.
3. Chernykh I. V. Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink. M.: DMK Press; SPb.: Piter, 2008. 288 p.
4. Geyzer A. I. Tramvaynye vagony modeley 71-402 i 71-403 s asinkhronnym privodom proizvodstva FGUP "Uraltransmash". Transport Urala. 2005. N. 2 (5). P. 46–51.
5. Safin A. R. Selection of Efficient Control Circuits for a Tram Traction Electric Drive on the Basis of Development of a Simulation Model. Russian Electrical Engineering. Allerton Press. 2013. V. 84, N. 1. P. 57–61.

УДК 621.793; 681.587

З. М. Хасанов, д. р техн. наук, проф., zimfirm@list.ru,
О. З. Хасанов, математик — системный программист,

Р. М. Гузаиров, начальник отдела информационной безопасности, управления и информационных технологий, Уфимский государственный авиационный технический университет

Математическая модель движения многосвязных систем электроприводов для технологических процессов электродугового плазменного напыления

Рассмотрены конструкционные решения проектирования прецизионных сложных многосвязных электроприводов для технологического оборудования электродугового плазменного напыления. Представлена математическая модель для оценки основных динамических параметров и характеристик механизмов многосвязных электроприводов.

Ключевые слова: автоматизация, динамика многосвязного движения, кинематическая схема, уравнения Лагранжа II рода, обобщенная координата и ее производные, держатель плазмотрона

Введение

Появление и быстрое совершенствование технологического оборудования электродугового плазменного напыления (ТО ЭПН), у которого координатный стол или рабочий орган выполняет точные программируемые перемещения с помощью многосвязных систем электроприводов (МСЭП), позволяющих точно выполнять комплекс разнородных технологических операций ЭПН в цеховых условиях и при действии на рабочие органы МСЭП всех голономных и неголономных связей, сил трения и качения, упругих деформаций, активных и пассивных сил, требуют создания принципиально новых систем автоматического управления ТО ЭПН и математических моделей для них.

Система управления МСЭП — трехуровневая. Два верхних уровня задают общую стратегию и тактику поведения систем электроприводов исходя из условия выполнения заданной технологической операции, т. е. плавный разгон (торможение) рабочих механизмов МСЭП до заданной скорости, равномерное или регулируемое движение. Они также выявляют аварийные ситуации и в случае обнаружения принимают меры по устранению. Нижний уровень состоит из пяти взаимосвязанных сепарантных подсистем адаптивного управления, каждая из которых управляет своим электроприводом в соответствии с управляющими сигналами, поступающими с верхнего уровня управления, что в итоге должно обеспечить согласованное движение рабочих органов МСЭП на заданных участках их маршрута по одному из возможных законов: с заданной скоростью, с заданным ускорением во всех режимах разгона, торможения.

Разработанное в Уфимском государственном авиационном техническом университете автоматизированное ТО ЭПН представлено на рис. 1, где использованы следующие обозначения: 1 — блок автоматического управления расходом плазмообразующих газов; 2 — технологическая установка; 3 — напыляемая деталь; 4 — каретка держателя плаз-

мотрона; 5 и 6 — измерители расхода массы газов; 8 — пирометр; 9 — измеритель угловых перемещений; 10 и 11 — измерители геометрических размеров детали с покрытием.

Задача управления исполнительными механизмами ТО ЭПН состоит в расчете программных управляющих воздействий на рабочие органы МСЭП по информации о траектории движения обрабатываемого изделия относительно каретки держателя плазмотрона или о скорости их взаимного перемещения. В общем случае для получения требуемой поверхности необходимо, чтобы в совокупности пять раздельных механизмов перемещались по шести независимым координатам. Число степеней подвижности для каждого отдельного механизма МСЭП выбирается таким образом, чтобы в совокупности они позволяли осуществлять перемещение по каждой из шести пространственных координат. При этом каждый механизм должен иметь произвольное число управляемых координат, меньшее шести, и при их программно согласованном взаимном перемещении они должны воспроизводить поверхность с заданными геометрическими размерами.

Существующие на сегодняшний день методики синтеза МСЭП в составе систем воспроизведения движения исполнительных механизмов ТО ЭПН не учитывают проблему программно-адаптивных режимов функционирования объектов управления ТО ЭПН. Кроме того, прецизионность таких МСЭП, их высокая стоимость, сложный характер силового взаимодействия компонентов, а также необходимость согласованного управления входящими в них приводами обусловливают тот факт, что процессы их проектирования, наладки и перестройки при переходе с одной технологической операции на другую чрезвычайно сложны и требуют больших затрат времени [1, 2].

Постановка задач управление

Решение проблемы повышения качества и конкурентоспособности деталей машин, изготавливаемых с использованием ТО ЭПН, невозможно без применения концепции CALS (Continuous Acquisition Life cycle Support). Способ достижения желаемых целей заложен в стратегию CALS, предполагающую создание комплекса PDM-систем (Product Data Management) для всех участников, проектирующих и эксплуатирующих ТО ЭПН.

PDM-система должна интегрировать всю связанную с изделием и ТО ЭПН информацию, включая геометрические и технические данные детали, чертежи, программное обеспечение и многое другое. Выступая в качестве средства интеграции, соединяющего множество различных компьютерных систем проектирования и поддерживающего жизненный цикл ТО ЭПН, PDM-система обеспечивает доступность для соответствующих сотрудников нужной им информации в нужное время и в нужной форме.

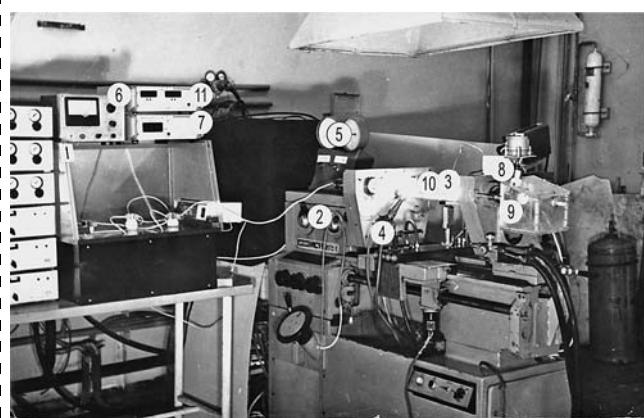


Рис. 1. Общий вид технологического оборудования ЭПН

В настоящее время разработано множество подходов и алгоритмов, позволяющих синтезировать системы управления сложными многосвязными электроприводами. Однако не все из них могут быть использованы при синтезе устройств управления МСЭП для ТО ЭПН. Основной причиной этого являются прецизионность и сложность конструкции МСЭП как механизма перемещения, обусловленные существенным и быстрым изменением параметров нагрузок его многосвязных электроприводов ввиду сильного взаимодействия всех степеней подвижности пяти взаимосвязанных прецизионных электроприводов.

Задачу синтеза многосвязных систем управления для каждой степени подвижности МСЭП разделили на несколько частей. Вначале необходимо провести синтез адаптивных корректирующих устройств, последовательно включаемых в канал управления каждого электропривода и стабилизирующих параметры нагрузки этого электропривода на номинальном уровне, т. е. компенсирующих воздействие со стороны остальных приводов. Это обеспечит независимость работы каждого электропривода от движения в других степенях подвижности. Каждый ЭП в МСЭП с синтезированной самонастройкой можно описать системой дифференциальных уравнений. После этого на втором этапе синтеза МСЭП для электропривода с уже постоянными параметрами одним из известных методов необходимо синтезировать САУ, обеспечивающую этому электроприводу заданную динамическую точность управления. По предложенной методике созданы опытные образцы МСЭП, работающие в прямоугольной декартовой, цилиндрической и комбинированной координатных системах [3].

Известные в настоящее время методы синтеза адаптивных цифровых систем управления МСЭП в зависимости от формы математического описания можно разделить на четыре основные группы: методы на основе аппарата дифференциальных и разностных уравнений; методы, основанные на аппарате интегральных уравнений; методы на основе интегральных преобразований Лапласа и Фурье; методы, основанные на спектральных формах представления математических моделей. Характеристиками систем соответственно являются: дифференциальные операторы, передаточные функции, импульсные переходные характеристики, спектральные характеристики относительно установленных или выбранных функций.

Кроме того, высокая стоимость, прецизионность и сложный характер силового взаимодействия всех компонентов МСЭП, а также необходимость согласованного управления всеми входящими в него электроприводами обуславливают то, что процессы их проектирования, наладки и перенастройки при переходе с одного ТП ЭПН на другой — чрезвычайно сложны и требуют больших затрат времени.

Изложенные выше обстоятельства делают весьма актуальной задачу разработки математического описания рассматриваемых МСЭП и методики их проектирования на ЭВМ. Успешное решение всего комплекса вышеописанных задач позволит существенно сократить сроки проектирования, повысить его качество, а также уменьшить материальные и временные затраты, увеличить быстродействие и гибкость МСЭП. Кроме того, разработанная математическая модель (ММ) движения рабочих механизмов многосвязных СЭП позволит проигрывать на ЭВМ новые перспективные алгоритмы адаптивного управления как всей системой в целом, так и отдельными входящими в него приводами.

Математическая модель управляемого движения механизмов МСЭП

Сущность технологической схемы ЭПН подробно описана в работе [1, 4]. В отличие от механической обработки поверхностей деталей при плазменном напылении наиболее важным фактором является точность задания скоростей перемещения плазмотрона относительно напыляемой поверхности детали. Кинематическая схема напыления на деталь, имеющей форму тела вращения, представлена на рис. 2. С помощью скорости перемещения v каретки держателя плазмотрона относительно детали, имеющей форму тела вращения, и контурной оборотной подачи (шага напыления) s определим скорости перемещения каретки держателя плазмотрона \dot{x}_Π , \dot{y}_Π , \dot{z}_Π в координатах станка $X_0; Y_0; Z_0$ и угловую скорость вращения ω главного электропривода ТО ЭПН, зависящую при заданных v и s от формы напыляемой детали (круговой цилиндр, прямой круговой конус) [5].

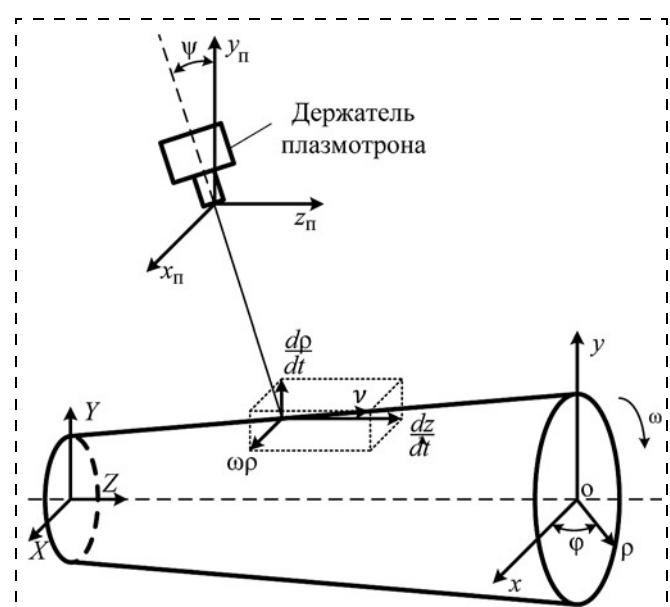


Рис. 2. Кинематическая схема напыления на деталь

Скорость движения рабочих механизмов держателя плазмотрона относительно напыляемой детали (рис. 2) можно описать уравнением

$$v = \sqrt{\left(\frac{d\rho}{dt}\right)^2 + \rho^2\left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}, \quad (1)$$

где ρ , ϕ , z — цилиндрические координаты.

Так как шаг напыления (оборотная подача) $s = 2\pi\gamma$, тогда для цилиндрической системы координат выражение для расчета шага спирали γ (траектории перемещения центра пятна напыления по напыляемой поверхности детали) имеет вид

$$\gamma = \sqrt{\gamma_z^2 + \gamma_\rho^2}, \quad (2)$$

здесь γ_z , γ_ρ — шаг проекции траектории перемещения центра пятна напыления на ось z и плоскость $z = 0$ соответственно.

При напылении на поверхность детали траекторию перемещения центра пятна описывает уравнение

$$z = \phi\gamma_z \cos\psi = \phi\gamma_z \left(\sqrt{1 + k_\psi^2}\right)^{-1}, \quad (3)$$

где ψ — угол между касательной и образующей тела вращения в текущей точке центра напыления и осью z , а выражение для расчета k_ψ имеет вид

$$k_\psi = \sin\phi \frac{d\rho}{dz} + \rho \cos\phi \frac{d\phi}{dz}. \quad (4)$$

Значение k_ψ определяется уравнением поверхности напыляемой детали $\rho = f(\phi, z)$. Условия обеспечения заданной толщины и шага волнистости покрытия можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} v = \sqrt{\left(\frac{d\rho}{dt}\right)^2 + \rho^2\left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}; \\ z = \frac{\phi\left(\sqrt{\gamma_z^2 + \gamma_\rho^2}\right)}{\sqrt{1 + \left(\sin\phi \frac{d\rho}{dz} + \rho \cos\phi \frac{d\phi}{dz}\right)^2}}; \\ \rho = \left(\sin\phi \frac{d\rho}{dz} + \rho \cos\phi \frac{d\phi}{dz}\right) z. \end{cases} \quad (5)$$

Первое уравнение системы определяет скорость перемещения держателя каретки плазмотрона, второе — уравнение траектории перемещения центра пятна напыления по поверхности вращающейся детали, а третье — уравнение поверхности напыляемой детали.

Кинематическая схема четырех взаимосвязанных электроприводов каретки держателя плазмотрона в узловой модели технологического оборудования ЭПН представлена на рис. 3. Здесь каждый электропривод МСЭП обладает одной степенью свободы. Формирование требуемой динамики движения

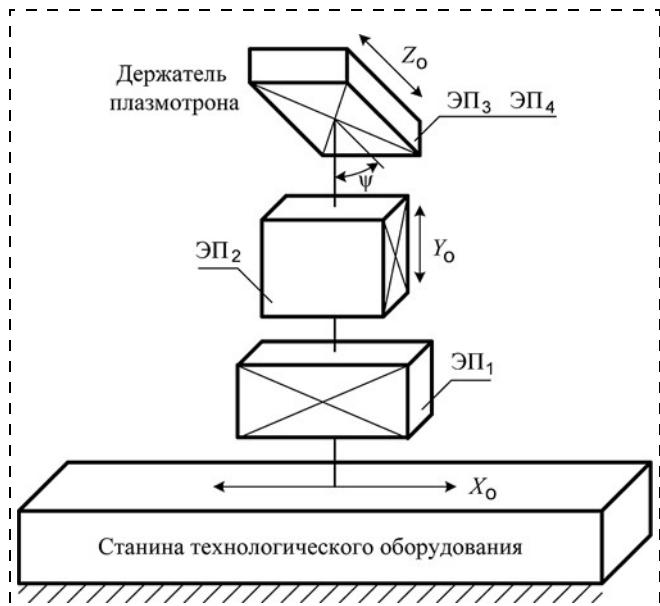


Рис. 3. Кинематическая схема четырех взаимосвязанных ЭП

рабочих механизмов электропривода происходит путем изменения скорости, ускорения и моментов сил, вызванных соответствующими системами управления системой взаимосвязанных электроприводов [6]. Значение результирующего ускорения, действующего на держатель плазмотрона, может быть определено путем анализа направлений действия ускорений узлов МСЭП и изменения перемещения системы координат x_n ; y_n ; z_n каретки держателя плазмотрона.

Совокупность взаимодействующих сил с источниками энергии и информационно-силовыми связями условно можно определить как обобщенный механизм МСЭП. Тогда объектами исследования становятся особенности поведения обобщенных механизмов МСЭП и соответствующие рассматриваемым задачам их принципы построения. Такое рассмотрение МСЭП позволяет решить прямые и обратные задачи синтеза рассматриваемой сложной механической системы.

Способ решения указанной выше задачи состоит в разработке уже на этапе предварительных работ математических моделей движения МСЭП, представленных в виде дифференциальных уравнений. Определение уравнений для САУ и методы проектирования их алгоритмов представлены в работах [7], в настоящей статье они не являются предметом обсуждения.

Пусть уравнения движения четырех многосвязанных ЭП каретки держателя плазмотрона и ЭП напыляемой детали заданы по методу Лагранжа [8]. Общий вид уравнения Лагранжа II рода [9]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial q_i} + \frac{\partial E_{\Pi}}{\partial q_i} = Q_i; i = 1, 2, \dots, \quad (6)$$

где E_K , E_Π — полная кинетическая и потенциальная энергии механической системы четырех многосвязных ЭП, рассчитанные относительно неподвижной системы отсчета X_0 ; Y_0 ; Z_0 , соответственно; q_i — обобщенные координаты, описывающие положение каретки держателя плазмотрона; \dot{q}_i — обобщенные скорости; Q_i — обобщенные силы; i — число уравнений, в рассматриваемом случае равное числу степеней свободы.

Суммарная кинетическая энергия, действующая на держатель плазмотрона, может быть представлена в виде суммы

$$E_K = E_{K1} + E_{K2} + E_{K3}, \quad (7)$$

здесь E_{K1} — кинетическая энергия в механической системе ЭП₁; E_{K2} — кинетическая энергия в механической системе ЭП₂; E_{K3} — кинетическая энергия во взаимосвязанных механизмах углового перемещения каретки держателя плазмотрона (ЭП₃, ЭП₄) относительно оси вращения напыляемой детали.

Тогда уравнения Лагранжа для представленной на рис. 3 модели движения каретки держателя плазмотрона имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{X}_0} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial X_0} + \frac{\partial E_\Pi}{\partial X_0} = Q_1; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{Z}_0} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial Z_0} + \frac{\partial E_\Pi}{\partial Z_0} = Q_2; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{Y}_0} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial Y_0} + \frac{\partial E_\Pi}{\partial Y_0} = Q_3; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_K}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial E_K}{\partial \psi} + \frac{\partial E_\Pi}{\partial \psi} = M, \end{array} \right. \quad (8)$$

где X_0 , Y_0 , Z_0 , ψ — обобщенные координаты (рис. 3); \dot{X}_0 , \dot{Y}_0 , \dot{Z}_0 , $\dot{\psi}$ — обобщенные скорости, соответствующие координатам; Q_1 , Q_2 , Q_3 — обобщенные силы, вызывающие соответствующие перемещения X_0 , Y_0 и Z_0 ; M — обобщенный момент силы, вызывающий угловое перемещение каретки держателя плазмотрона, определенное углом ψ .

Пусть исполнительный механизм ЭП₁ с массой m_1 движется вдоль оси перемещения OX_0 возвратно-поступательно с программно изменяющейся скоростью \dot{x}_Π^1 . Следовательно,

$$E_{K1} = m_1(\dot{x}_\Pi^1)^2/2. \quad (9)$$

Во время обратного хода ЭП₁ исполнительный механизм вертикального перемещения ЭП₂ с массой m_2 движется поступательно вдоль оси OY_0 со скоростью \dot{y}_Π^2 . Тогда

$$E_{K2} = m_2(\dot{y}_\Pi^2)^2/2. \quad (10)$$

Движения механизмов позиционирования держателя плазмотрона складываются из переносного

движения исполнительного механизма ЭП₃ (вращательного в плоскости $x_\Pi 0y_\Pi$ относительно угла ψ) и относительного движения взаимосвязанных механизмов электроприводов ЭП₃, ЭП₄ (поступательного вдоль оси $0z_\Pi$ выдвижения плазмотрона). Поэтому

$$E_{K3} = E_{K3(\text{пер})} + E_{K3(\text{отн})}, \quad (11)$$

где $E_{K3(\text{пер})} = J_3 \dot{\psi} / 2$, $E_{K3(\text{отн})} = (m_3 + m_4)(\dot{z}_\Pi^3 + \dot{z}_\Pi^4)^2 / 2$.

Обобщенные координаты подвижной массы механизмов электропривода позиционирования ЭП₃ и выдвижения ЭП₄ (рис. 4) представим выражениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} z_\Pi^{m_1} = Z_0^\Pi + (z_{m_i} + 0,5L)\sin\psi; \\ y_\Pi^{m_1} = (z_{m_i} + 0,5L)\cos\psi; \\ z_\Pi^{m_i} = Z_0^\Pi + z_{m_i}\sin\psi; \\ y_\Pi^{m_i} = z_{m_i}\cos\psi; \\ z_\Pi^{m_n} = Z_0^\Pi + (z_{m_i} - 0,5L)\sin\psi; \\ y_\Pi^{m_n} = (z_{m_i} - 0,5L)\cos\psi. \end{array} \right. \quad (12)$$

Тогда значения составляющих обобщенной скорости находятся из следующих зависимостей:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{z}_\Pi^{m_1} = \dot{Z}_0^\Pi + \dot{z}_{m_i}\sin\psi + \dot{\psi}(z_{m_i} + 0,5L)\cos\psi; \\ \dot{y}_\Pi^{m_1} = \dot{z}_{m_i}\cos\psi - \dot{\psi}(z_{m_i} + 0,5L)\sin\psi; \\ \dot{z}_\Pi^{m_i} = \dot{Z}_0^\Pi + \dot{z}_{m_i}\sin\psi + \dot{\psi}z_{m_i}\cos\psi; \\ \dot{y}_\Pi^{m_i} = \dot{z}_{m_i}\cos\psi - \dot{\psi}z_{m_i}\sin\psi; \\ \dot{z}_\Pi^{m_n} = \dot{Z}_0^\Pi + \dot{z}_{m_i}\sin\psi - \dot{\psi}(0,5L - z_{m_i})\cos\psi; \\ \dot{y}_\Pi^{m_n} = \dot{z}_{m_i}\cos\psi + \dot{\psi}(0,5L - z_{m_i})\sin\psi. \end{array} \right. \quad (13)$$

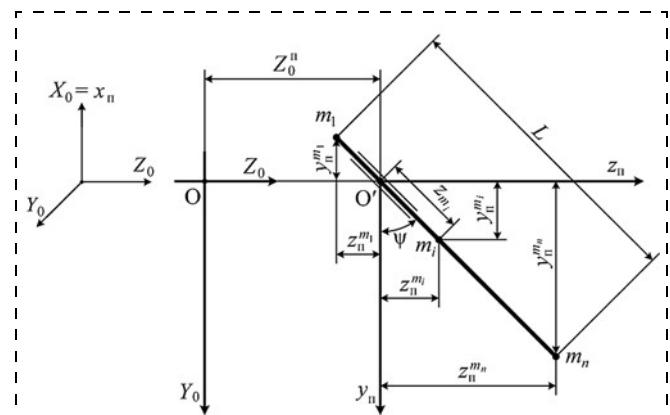


Рис. 4. Схема для расчета динамики движения держателя плазмотрона

Решив системы уравнений (8)–(13), получим выражение для расчета кинетической энергии для перемещения каретки держателя плазмотрона:

$$E_K = \frac{1}{2} [J_{\Sigma} \dot{\psi}^2 + m_x \dot{X}_0^2 + m_y \dot{Y}_0^2 + m_1 (\dot{z}_{\pi}^{m_1})^2 + m_1 (\dot{z}_{\pi}^{m_1})^2 + m_n (\dot{z}_{\pi}^{m_n})^2 + m_n (\dot{y}_{\pi}^{m_n})^2], \quad (14)$$

где J_{Σ} — суммарный момент инерции масс многосвязных механизмов всех четырех ЭП, приведенный к неподвижной системе координат X_0, Y_0, Z_0 ; m_x, m_y — массы механизмов ЭП₁ и ЭП₂ при движении вдоль осей соответственно X_0 и Y_0 ; m_1, m_n — массы многосвязных механизмов ЭП₃ и ЭП₄ при минимальном и максимальном выдвижении положения держателя плазмотрона (рис. 4); $\dot{z}_{\pi}^{m_1}, \dot{y}_{\pi}^{m_1}, \dot{z}_{\pi}^{m_n}$ и $\dot{y}_{\pi}^{m_n}$ — минимальные и максимальные значения скоростей для заданных масс m_1, m_n , определенные из зависимости (13); \dot{X}_0, \dot{Y}_0 и $\dot{\psi}$ получаем из уравнения (8).

Максимальный суммарный момент инерции J_{Σ} определяется по формуле

$$J_{\Sigma} = J_{X_0} + J_{Y_0} + J_{z_{\pi}}^{m_i} + J_{z_{\pi}}^{\psi} + m_n (0,5L + z_{m_i})^2 + m_1 (0,5L - z_{m_i})^2, \quad (15)$$

здесь J_{X_0} и J_{Y_0} — моменты инерции подвижных масс механизмов ЭП₁ и ЭП₂; $J_{z(\phi)}$, $J_{z_{\pi}}$ — моменты инерции подвижных масс взаимосвязанных механизмов ЭП₃, ЭП₄ (позиционирование по углу ψ , по координате z_{π}).

С учетом собственного веса держателя плазмотрона потенциальную энергию, действующую на модуль ЭП₃, ЭП₄, можно найти из выражения

$$E_{\pi(i)} = x_{\pi} m_n g, \quad (16)$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

Подставив выражения (14) и (16) в систему уравнений (7) и обозначив массу подвижных элементов ЭП₁, ЭП₂, ЭП₃ (равную массе ЭП₄) соответственно $m_x + m_y + m_n = m_1; m_y + m_n = m_2$ и $m_z + m_{\psi} = m_n$, получим новую систему дифференциальных уравнений движения рассматриваемой модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{X}_0 + m_2 \ddot{z}_{m_i} \sin \psi + m_2 \ddot{\psi} \dot{z}_{m_i} \cos \psi + \\ + 2m_2 \dot{\psi} \dot{z}_{m_i} \cos \psi - m_2 \dot{\psi}^2 z_{m_i} \sin \psi = Q_1; \\ m_n (\ddot{Y}_0 + g) = Q_2; \\ m_2 \ddot{X}_0 \sin \psi + m_2 \ddot{z}_{m_i} - 2m_2 \dot{\psi}^2 z_{m_i} = Q_3; \\ (J_{\Sigma} + 2m_2 z_{m_i}^2) \ddot{\psi} + m_2 \ddot{X}_0 z_{m_i} \cos \psi + \\ + 4m_2 \dot{z}_{m_i} z_{m_i} \dot{\psi} = M. \end{array} \right. \quad (17)$$

Система уравнений (17) получена при следующих условиях:

1. Механические элементы всех узлов многосвязных ЭП жесткие и не подвергаются деформациям под влиянием действующих на них сил.

2. Обобщенные силы Q_1, Q_2, Q_3 и момент M имеют номинальные значения и не учитывают сопротивления трения покоя и движения.

На этапе математического моделирования принятые положения не меняют существенным образом динамику движения электроприводов, тем более что установление достоверности полученных из системы уравнений (17) результатов происходит на этапе натурных испытаний модели на реальных многосвязных приводах автоматизированного технологического оборудования электродугового плазменного напыления.

Система дифференциальных уравнений (17) численно исследована в программных пакетах Maple и MathCAD. Расчеты системы уравнений (17) проводили при различных начальных распределениях обобщенных сил и скоростей, вызывающих синхронное или программное перемещение держателя плазмотрона относительно движения напыляемой детали.

Система уравнений позволяет получать динамические параметры всех многосвязных ЭП, определять пространственные координаты их центра тяжести, а методика расчета может быть реализована как для работы в приращениях, так и для работы в абсолютных координатах.

Заключение

1. Разработана математическая модель для оценки динамических сил, моментов и ускорений в узлах и элементах сложных многосвязных ЭП, исполнительные механизмы которых двигаются во взаимосвязанных друг с другом цилиндрических или прямоугольных системах координат.

2. Оценка скорости и ускорения, действующих на держатель плазмотрона и на зажимы крепления напыляемой детали при непостоянной скорости движения приводов и при определенных характеристиках узлов многосвязных приводов друг с другом, дает возможность оптимально подобрать технические и эксплуатационные параметры каждого привода МСЭП. Например, представленные уравнения динамики движения для заданных значений переносимых масс, длительности отдельных движений или заданных значений скоростей и ускорений позволяют определить как предельные динамические, так и оптимальные параметры отдельных узлов и в целом всех многосвязных обобщенных механизмов МСЭП.

3. Для подтверждения основных теоретических выводов были проведены экспериментальные исследования динамики движения механизмов МСЭП. Проведенные эксперименты показали удовлетворительное совпадение (4...5 %) полученных теоретических и экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Бобров Г. В., Ильин А. А. Нанесение неорганических покрытий: (теория, технология, оборудование): Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Интермет Инжиниринг, 2004. 624 с.
2. Хасанов З. М. Автоматизированное технологическое оборудование для электродугового плазменного напыления // Сварочное производство. 2006. № 5. С. 44–50.
3. Хасанов З. М., Хасанов О. З. Самонастраиваясь управляющая система с моделью для динамического управления электроприводами в высокотемпературных технологических процессах // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 12. С. 23–32.
4. Хасанов З. М., Хасанов О. З. Методика моделирования адаптивной системы управления автоматизированным электроприводом методом эквивалентных структурных преобразований // Технология машиностроения. 2007. № 8. С. 58–67.
5. Хасанов З. М., Хасанов О. З. Об эффективности использования функций связи между контрольно-управляющими устройствами в системах адаптивного управления электроприводами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 6. С. 32–39.
6. Хасанов З. М., Гузаиров Р. М. К задаче синтеза систем электроприводов технологического оборудования электродугового плазменного напыления // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 1. С. 146–149.
7. Хасанов З. М., Гузаиров Р. М. К проектированию широкодиапазонного электропривода для технологического оборудования электродугового плазменного напыления // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 1. С. 128–134.
8. Кулаков Ф. М. Супервизорное управление манипуляционными роботами. М.: Наука, 1980. 448 с.
9. Коренев Г. В. Целенаправленная механика управляемых манипуляторов. М.: Наука, 1979. 447 с.

Z. M. Khasanov, Professor, zimfirm@list.ru, **O. Z. Khasanov**, mathematician, system programmer,
R. M. Guzairov, Head of Department Information Security, management of Information Technology,
Ufa State Aviation Technical University

The Mathematical Model of the Motion of Multicoupling Electric Drives Systems for the Technological Processes Electric Arc Plasma Spraying

This paper shows a general approach to building of automation systems for production equipment of plasma electric arc spraying, based on algorithmic control of workpiece form elements and, the assignment of motion algorithms for precise mechanisms in multivariable electric drive systems (MEDS) taking into account a variability of forces and moments in MEDS mechanisms. The algorithms of adaptive control implementation and parameters computation for a special class of precise mechanisms in MEDS built on the basis of closed-chain mechanisms for divided motion of processing tools and workpieces in three-dimensional space are proposed.

One of speed increase variant by means of auxiliary time reduction of plasma torch mechanisms motion using programmed correction of control signals by acceleration and braking is described. The development of mathematical model of MEDS performing coordinated motion of plasma torch holder mechanisms and workpiece is considered. The technique of MEDS kinematic and dynamic parameters calculation during technology cycles of plasma coating is proposed. The requirements to mathematical modelling tools are considered.

Keywords: automation, multivariable dynamic motion, kinematics, Lagrange equations of type II, generalized coordinates and its derivatives, the holder the plasmatron

References

1. Бобров Г. В., Ильин А. А. Нанесение неорганических покрытий: (теория, технология, оборудование): Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Интермет Инжиниринг, 2004. 624 с.
2. Хасанов З. М. Автоматизированное технологическое оборудование для электродугового плазменного напыления. Сварочное производство. 2006. № 5. С. 44–50.
3. Хасанов З. М., Хасанов О. З. Самонастраиваясь управляющая система с моделью для динамического управления электроприводами в высокотемпературных технологических процессах. Автоматизация и современные технологии. 2008. № 12. С. 23–32.
4. Хасанов З. М., Хасанов О. З. Методика моделирования адаптивной системы управления автоматизированным электроприводом методом эквивалентных структурных преобразований. Технология машиностроения. 2007. № 8. С. 58–67.
5. Хасанов З. М., Хасанов О. З. Об эффективности использования функций связи между контрольно-управляющими устройствами в системах адаптивного управления электроприводами. Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 6. С. 32–39.
6. Хасанов З. М., Гузаиров Р. М. К задаче синтеза систем электроприводов технологического оборудования электродугового плазменного напыления. Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 1. С. 146–149.
7. Хасанов З. М., Гузаиров Р. М. К проектированию широкодиапазонного электропривода для технологического оборудования электродугового плазменного напыления. Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 1. С. 128–134.
8. Кулаков Ф. М. Супервизорное управление манипуляционными роботами. М.: Наука, 1980. 448 с.
9. Коренев Г. В. Целенаправленная механика управляемых манипуляторов. М.: Наука, 1979. 447 с.