

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РЕГУЛЯТОРАХ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОДНЫХ ПЕЧЕЙ

Рубцов В.П., Рубцов М.В.

НИУ МЭИ, Москва, Россия, RubtsovVP@mpei.ru

Аннотация - Рассматривается структура регулятора режима электрической печи с перемещающимся электродом, построенная на основе электропривода с шаговым двигателем. Приводятся результаты исследования на основе разработанной имитационной модели, составленной в среде Matlab/Simulink, и даются рекомендации по выбору параметров системы.

Ключевые слова – электрическая печь, перемещение электрода, электропривод с шаговым двигателем, система управления, имитационная модель системы управления.

ВВЕДЕНИЕ

В регуляторах режима электродных электропечей (дуговых и электрошлаковых) переменного и постоянного тока для перемещения электрода, обеспечивающего зажигание дуги и регулирование вводимой в печь мощности, традиционно используют электрические приводы с двигателями постоянного тока и электрогидравлические приводы [1]. В последнее время в связи с созданием массового частотно-регулируемого привода с асинхронными короткозамкнутыми двигателями предпринимаются попытки его использования в регуляторах перемещения электродов электрических печей. Однако достоверная информация о характеристиках регуляторов электродных печей с частотно-регулируемым электроприводом отсутствует. Особенностью механизма вертикального перемещения электрода электродных электропечей является неуравновешенный характер нагрузки, что приводит к необходимости использования самотормозящихся преобразователей вращательного движения электродвигателя в поступательное движение электрода или различного рода разгрузочных устройств, усложняющих кинематику механизма, снижающих точность и ухудшающих динамические характеристики регулятора. Полного уравнивания вертикально перемещающихся элементов механизма (электрода, каретки, подводных кабелей и т. п.) достигнуть, как правило, не удастся, поэтому в механизме всегда присутствует направленная вниз сила, приводящая к опусканию электрода даже при работающем регуляторе. В следящем приводе, которым является регулятор электродных электропечей, в момент равновесия напряжение на электродвигатель не поступает, момент он не создает, что приводит к «сползанию» электрода под действием неуравновешенных масс механизма перемещения электрода. Эта неуравновешенная сила проявляет себя

как возмущающее воздействие, приводящее к возникновению колебательных процессов в регуляторе.

Представляет интерес исследование возможности и целесообразности построения регулятора перемещения электрода, построенного на базе дискретного привода с шаговым электродвигателем (ШД). Проведение такого исследования обусловлено тем, что по определению привод с шаговым двигателем как нельзя лучше удовлетворяет специфическим требованиям рассматриваемого класса механизмов. Действительно, привод с ШД по своей структуре является дискретной разомкнутой следящей системой без датчика обратной связи. Его важным отличием от других (непрерывных) электроприводов является то, что в положении равновесия системы, т. е. при сигнале рассогласования равном нулю, по фазам двигателя протекает ток и создается момент (практически номинальный), удерживающий механизм от «сползания» [2].

Положительным свойством регулятора режима с шаговым двигателем можно считать также и то обстоятельство, что его система управления в большей степени в сравнении с «непрерывными приводами» приспособлена к использованию современных управляющих контроллеров.

СТРУКТУРА РЕГУЛЯТОРА РЕЖИМА ЭЛЕКТРОДНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

Структура регулятора режима электродной электропечи инвариантна относительно типа электропривода и вида печи. Структура привода с ШД применительно к регулятору режима электродной печи также является типовой [2]. Использование привода с шаговым двигателем для перемещения электрода позволяет упростить кинематическую схему механизма, исключив все уравнивающие приспособления. Поскольку ШД, как правило, являются многополусными машинами, механизм перемещения электрода может быть выполнен безредукторным, а использование в кинематической передаче шариковой винтовой пары позволит повысить точность регулятора и уменьшить мощность двигателя. По существу механизм перемещения электрода в печи с шаговым двигателем оказывается аналогичным механизму с гидроприводом, у которого при нулевом сигнале рассогласования регулятора сохраняется разность давлений в камерах гидродвигателя, удерживающая электрод в заданном положении. Для исключения «падения» электрода при отключении питания привода в кинематическую схему механизма может быть включен электромагнитный тормоз по аналогии с типовыми лебедками.

В приводе рассматриваемого регулятора может быть использован специализированный шаговый двигатель индукторного типа или с постоянными магнитами, а также серийно выпускаемые синхронные двигатели с постоянными магнитами. Для управления синхронными двигателями, работающими в шаговом режиме, пригодны серийные транзисторные преобразователи частоты, выпускаемые для управления асинхронными двигателями. Более того, в настоящее время серийно выпускаются синхронные приводы, работающие как в режиме частотного регулирования, так и в режиме шагового привода. По существу привод с шаговым двигателем представляет собой частотно-регулируемый синхронный привод, управляемый полем статора. Современные программируемые контроллеры пригодны для решения задач управления шаговыми двигателями. Выпускаются и специализированные контроллеры для управления шаговыми двигателями, следовательно, техническая реализация регулятора перемещения электродных печей не вызывает затруднений. В то же время использование шагового (или частотно-регулируемого) привода позволяет упростить механическую часть регулятора электродной печи, повысить КПД и точность привода. Применение дискретного следящего привода с шаговыми двигателями можно считать перспективным особенно для прецизионных электропечей малой емкости с вертикально перемещающимися электродами, потребность в которых в настоящее время проявляется особенно остро.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА С ШАГОВЫМ ПРИВОДОМ

Регулятор дуговой печи является нелинейной системой управления, модель которой удобно представить в виде структурной схемы, включающей в себя собственно печь и привод с шаговым двигателем. Поскольку предметом исследования регулятора перемещения электрода с шаговым электроприводом являются механические процессы, характеризующие работу системы, то может быть использована упрощенная модель печи [1]. Дискретный привод с ШД описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений [2], которая использована при составлении его модели. Для исследования регулятора с ШД с целью получения обобщенных характеристик удобно использовать систему относительных величин [2]. В качестве базовых величин приняты: M_m – максимальный синхронизирующий момент ШД; $\omega_0 = \sqrt{z}M_m / J$ – круговая частота собственных колебаний привода; z – число пар полюсов ротора синхронного двигателя или число зубцов ротора индукторного ШД; J – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции системы двигатель – механизм; $U_{ном}$ – номинальное напряжение питания дуговой печи; L_m – условная максимальная длина дуги, при которой дуга «разрывается». Относительные (безразмерные) величины определяются при этом как: $\tau = 2\pi/\omega_0$ – относительное время; $\mu = M/M_m$ – относительный момент; $\beta = M_m/\omega_0$ – относительный коэффициент вязкого трения, учитывающий вязкое

трение нагрузки и демпфирующие свойства ШД; $\theta = 2\pi/n$ – электрический угол поворота ротора ШД; n – число тактов коммутации фаз шагового двигателя; $\theta_m = \theta/z$ – механический угол поворота ротора ШД; $\gamma = \alpha n$ – функция воздействия для ШД, определяющая угол поворота магнитного поля статора; $\alpha = 2\pi/n$ – электрический шаг двигателя; $U/U_{ном}$ – напряжение на дуге.

С учетом изложенного выше с использованием относительных величин была составлена структурная схема регулятора дуговой печи постоянного тока с шаговым электроприводом, в которой переменные и параметры элементов записаны в относительных единицах. Дискретный характер перемещения электромагнитного поля статора ШД учитывается в схеме введением квантователя, вырабатывающего на выходе сигнал αn , где α – шаг двигателя, а n – порядковый номер импульса управления. Инерционность обмоток статора ШД учитывается в структурной схеме инерционным звеном с передаточной функцией $1/(\sigma p + 1)$. Блок ограничения реализует условие $|\gamma - \theta| = \pi/2$, которое означает, что рассогласование между полем статора и ротором в нормальных режимах работы не должно превышать половины периода угловой характеристики момента ШД, определяемого как $M_m \sin(\gamma - \theta)$.

Механическая часть привода определяется в структурной схеме интегратором с передаточной функцией k_m/p , на выходе которого вырабатывается сигнал пропорциональный скорости ω , и каналами отрицательной обратной связи, формирующими сигналы, соответственно момента сухого $\mu_t \operatorname{sign} \omega$ и «вязкого» трения $\beta\omega$. Активный момент нагрузки μ_a , соответствующий весу электрода и каретки с электрододержателем, учитывается в структурной схеме в виде возмущающего воздействия μ_a .

Разработанная структурная схема позволяет исследовать регулятор при использовании как физических, так и относительных величин. Использование последних позволяет получить обобщенные результаты исследования, пригодные не только для одного конкретного значения параметров, но и для целого класса систем.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Рассматриваемая система является нелинейной в связи с чем её исследование удобно проводить на основании численного решения дифференциальных уравнений. Исследования проводились с использованием имитационной модели, составленной на основании структурной схемы в среде *MatLab Simulink* [3]. Имитационная модель позволяет проводить анализ и синтез регулятора, как при настройке действующей установки, так и при ее проектировании. Исследование регулятора перемещения электрода на имитационной модели проводилось путем расчета и вывода на виртуальный осциллограф переходных функций задания угла поворота ротора ШД $\alpha n(\tau)$, скорости ШД $\omega(\tau)$, угла поворота ротора ШД $\theta(\tau)$ и возмущения по активному моменту $\mu_a(\tau)$ для режима зажигания дуги из положения короткого замыкания и последующего «наброса» активного момента нагрузки μ_a . Целью исследования являлось определение устойчивости, статической и динамической ошибок регулирования следящей системы при воздействии возмущений, а также уточнения

структуры регулятора и необходимости введения коррекций системы для устойчивости и улучшения качества регулирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Регулятор перемещения электрода с шаговым приводом характеризуется большим числом параметров, оказывающих влияние на его характеристики. Исследовать влияние всех параметров регулятора на данном этапе затруднительно, поэтому ограничимся рассмотрением основных параметров, оказывающих существенное влияние на устойчивость, качество и точность регулирования.

Анализ устойчивости. Как показали исследования, следящий привод, построенный без учета особенностей управления ШД, оказывается неустойчивым. Как известно [2], ШД является колебательной системой с низким демпфированием, т. е. склонен к колебаниям, а при частотах управления, кратных частоте собственных колебаний, возникают резонансные явления, которые могут приводить к потере управляемости (сбоям в системе). Кроме того, динамические характеристики ШД определяются так называемой частотой приемистости $\omega_{пр}$, под которой понимают максимальное значение скачкообразного изменения частоты управления ω , не приводящего к выпадению двигателя из синхронизма [2]. Специфика привода с ШД проявляется в том, что система оказывается критичной к значению коэффициента усиления и скорости изменения угла. Физический смысл влияния коэффициента усиления заключается в том, что он определяет скорость изменения задания угла поворота ШД, которую следует ограничивать для исключения выпадения двигателя из синхронизма. Исследования показали, что в регуляторе режима печи с шаговым электроприводом может быть обеспечен устойчивый процесс регулирования только путем подбора коэффициента усиления системы и ограничения сигнала задания скорости. Колебательный характер движения ШД на начальном участке переходного процесса не оказывает никакого влияния на точность регулятора печи, однако и указанные колебания, как показали исследования, могут быть устранены путем подбора коэффициента усиления системы, величины ограничения задания или введением пропорционально-интегрального регулятора в канал задания.

Точность регулирования определяется величиной статической ошибки, которая в устойчиво работающем регуляторе не должна превышать $\pm \pi/4$ рад на угловой характеристике ШД или области 200 мкм для перемещения электрода. Статическая ошибка регулирования соответствует максимально допустимому моменту нагрузки двигателя, равному половине максимального момента электродвигателя ($\mu_a + \mu_t = 0,4$). Проведенные исследования подтверждают сделанные выше предположения о том, что шаговый двигатель удерживает электрод в

неуравновешенном механизме даже при отсутствии сигнала рассогласования.

Влияние числа тактов коммутации ШД. Устойчивость движения ШД не только в области резонансных частот, но и во всем диапазоне его работы специально анализировалась при исследовании. Как показали исследования, наличие механической нагрузки на валу и внутреннее демпфирующее действие обмоток статора ШД исключает сбой в его работе даже при минимальном числе тактов коммутации $n = 4$. Управление ШД с использованием эффекта «дробления шага» применяют в ряде случаев [2] для улучшения устойчивости и качества движения привода. Очевидно, что при «дроблении шага» дискретность перемещения поля статора ШД становится пренебрежимо малой и не оказывает влияния на движение ротора, которое при этом носит непрерывный характер. Использование управления ШД с «дроблением шага» оказывает благоприятное влияние на качество и устойчивость привода, однако при этом следует иметь в виду, что блок управления двигателем усложняется и становится дороже. Исследования показали, что для регулятора перемещения электрода печи можно использовать простейшее управление ШД.

Влияние инерционностей в каналах задания и обратной связи. В реальных регуляторах перемещения электродов печей используются элементы, обладающие инерционностями: обмотки управления ШД имеют индуктивность, вызывающую запаздывание поля статора, на выходе датчика напряжения печи, как правило, устанавливают фильтр, который учитывается в модели инерционным звеном первого порядка. Проведенный анализ показал, что изменение постоянных времени σ и T в интервале 0 – 10 (в относительных единицах) не оказывает влияния на устойчивость работы регулятора при сохранении ранее использованных настроек в канале задания. Постоянная времени обмоток управления ШД σ проявляет себя как дополнительная нагрузка типа вязкого трения и снижает максимальную скорость привода. При проектировании привода целесообразно выбирать систему управления ШД, обеспечивающую условие $\sigma < 0,1$. Инерционность в канале обратной связи приводит к возникновению большой динамической ошибки, поэтому постоянную времени T целесообразно ограничивать, устанавливая ее в пределах $0 < T < 5$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кручинин, А.М. Автоматическое управление электротермическими установками: Учебник для вузов / А.М. Кручинин, К.М. Махмудов, Ю.М. Миронов и др. Под ред. А.Д. Свенчанского – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Чиликин, М.Г. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями / М.Г. Чиликин, Б. А. Ивоботенко, В. П. Рубцов и др. – М.: Энергия, 1971.
3. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008.
4. Сиротин А. А. Автоматическое управление электроприводами, М., «Энергия», 1969.