

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КЛАССИЧЕСКИХ И НЕЧЕТКИХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МНОГОТОЧЕЧНОГО ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ

Одним из способов изготовления деталей двойной кривизны, применяемых при производстве корпусов самолетов и судов, является гибка листового материала на формовочной установке, представляющая собой сложный механизм. В статье рассматривается вопрос применения различных алгоритмов управления системой многоточечного формования изделий. Выполняется сравнительный анализ классического и нечеткого алгоритмов управления. На основе проведенных исследований делается вывод о целесообразности применения того или иного алгоритма управления.

Ключевые слова: взаимосвязанная система управления, электромеханическая система, нечеткое регулирование.

Введение. Операция изготовления детали посредством формовочной установки является сложным технологическим процессом, на который оказывают влияние различные по природе параметры, такие как свойства и температура материала, скорость формования, размеры заготовки и др. Одним из возможных вариантов реализации формовочной установки является установка, представляющая собой реконфигурируемую оснастку из набора формирующих стержней [1]. Привод линейных перемещений данных стержней — индивидуальный, электрический. Такое построение формовочной установки приводит к тому, что система управления процессом формования будет представлять собой систему взаимосвязанных электроприводов через общий объект — формуемую заготовку.

Основная часть. В процессе работы установки между приводами формирующих стержней существует взаимосвязь, влияние которой выражается в дополнительной нагрузке на привод каждого из стержней в момент их одновременного перемещения [2]. Заранее учесть поведение установки при случайном сценарии формования проблематично, поэтому нужно предусмотреть возможность компенсации взаимосвязи между приводами. Кроме того, необходимо контролировать скорость формования во избежание дефектов формируемой детали [1].

Как известно, компенсировать вредное влияние взаимосвязи можно либо путем введения дополнительного компенсирующего канала [3], либо

возложив дополнительное функциональное воздействие на основной регулятор контура регулирования [4].

Первый подход ведет к усложнению системы регулирования, а передаточная функция компенсирующего канала не всегда физически реализуема. Проиллюстрируем вышесказанное на примере позиционного электропривода одного из стержней, функциональная схема которого приведена на рис. 1, а на рис. 2 — развернутая структурная схема электропривода стержня.

В роли возмущающих воздействий на объект управления выступают параметры, характеризующие свойства материала и размеры формируемой заготовки:

- σ_s — предел текучести;
- B — ширина заготовки, м;
- S — толщина заготовки, м;
- L — расстояние между осями оппозитно расположенных стержней, м;
- μ — коэффициент трения между стержнем и заготовкой.

Исходя из классической теории автоматического управления [5], определим передаточную функцию компенсирующего канала:

$$W_k(p) = \frac{1}{W_{\text{пр}}(p)},$$

где $W_{\text{пр}}(p)$ — передаточная функция прямого канала.

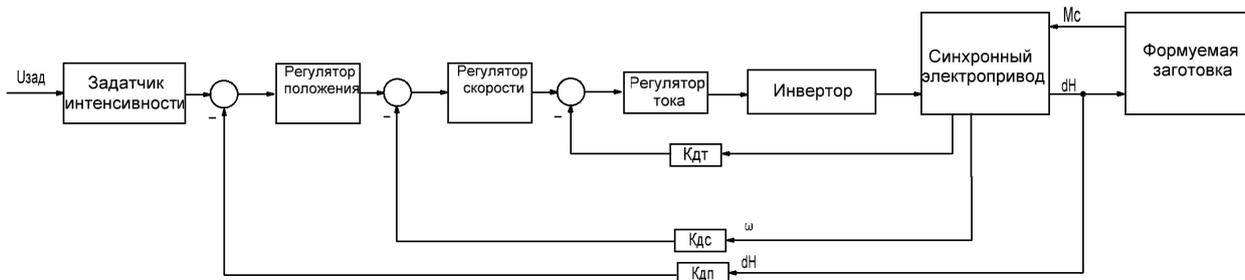


Рис. 1. Структурная схема электропривода стержня

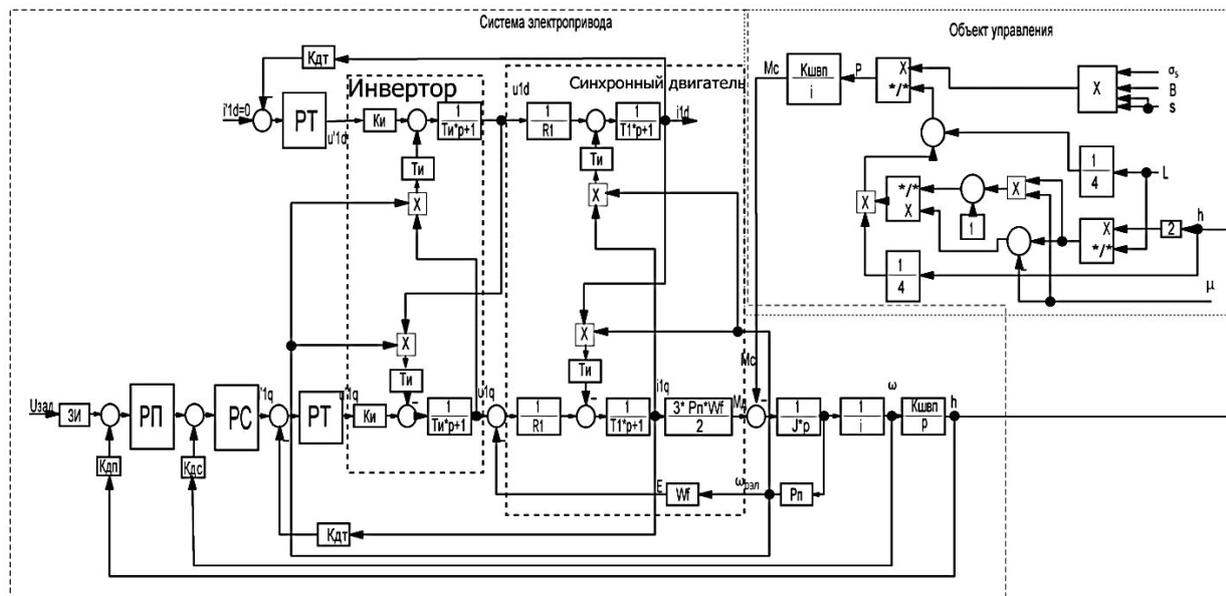


Рис. 2. Развернутая структурная схема электропривода стержня

Применительно к рассматриваемой системе передаточная функция прямого канала будет иметь вид:

$$W_{\text{пр}}(p) = W_{\text{PC}}(p) \cdot W_{\text{ЗКТ}}(p) \cdot K_A,$$

где $W_{\text{PC}}(p)$ — передаточная функция регулятора скорости; $W_{\text{ЗКТ}}(p)$ — передаточная функция замкнутого контура тока; $K_A = \frac{3}{2} P_{\text{п}} \cdot \psi_f$ — коэффициент двигателя; $P_{\text{п}}$ — число пар полюсов; ψ_f — потокосцепление ротора, Вб.

Тогда

$$W_{\text{пр}}(p) = K_{\text{PC}} \cdot \frac{T_{\text{PC}} \cdot p + 1}{T_{\text{PC}} \cdot p} \cdot \frac{1}{2T_{\text{м}} \cdot p + 1} \cdot K_A,$$

$$W_{\text{к}}(p) = \frac{T_{\text{PC}} \cdot p \cdot (2T_{\text{м}} \cdot p + 1)}{K_{\text{PC}} \cdot K_A \cdot (T_{\text{PC}} \cdot p + 1)}.$$

Полученная передаточная функция компенсирующей цепи физически не реализуема в силу того, что степень числителя выше степени знаменателя.

Необходимо отметить и тот факт, что иногда вызывает затруднения измерение возмущения (в нашем случае в качестве возмущения выступает дополнительная составляющая момента на валу приводного двигателя, которую трудно выделить).

Тогда используют некоторые приемы, позволяющие приблизиться к инвариантности регулируемой координаты от возмущения без непосредственного измерения последнего [6]. В частности, создается компаундирующая связь, то есть дополнительная связь внутри замкнутого контура регулирования по одной из его промежуточных координат, зависящих от возмущения (несущих информацию о возмущении). Но такое решение связано со значительным усложнением структуры системы регулирования.

Таким образом, применение компенсирующих цепей имеет как преимущества, так и недостатки. Поэтому рассмотрим еще один подход к решению задачи компенсации взаимосвязи между электроприводами формующей установки.

При использовании второго подхода от регулятора потребуются адаптация к изменению параметров контура регулирования, ряд которых, оказывающих негативное влияние на точность позиционирования, не поддается количественной оценке, а может быть охарактеризован только качественными величинами (структура материала, распределение примесей в сплаве и т. п.) и одновременно решение задачи компенсации взаимосвязи между приводами.

Иными словами, регулятору необходимо реализовать определенный закон регулирования координат электропривода, осуществлять компенсацию взаимосвязей, а также контролировать скорость формирования, удерживая её в заданных пределах, независимо от работы соседних стержней.



Рис. 3. Структурная схема системы

Вначале рассмотрим возможность решения такой задачи традиционными методами, например, путем использования классического ПИД-регулятора.

Как известно, ПИД-регулятор формирует управляющий сигнал, являющийся суммой трёх слагаемых, первое из которых пропорциональные разности входного сигнала и сигнала обратной связи (сигнал рассогласования), второе — интеграл сигнала рассогласования, третье — производная сигнала рассогласования.

Теоретические методы анализа системы с ПИД-регулятором редко применяются на практике. Основная сложность практического применения — неполнота математического описания объекта управления. Кроме того, существенную проблему представляют нелинейность и нестационарность системы. Практические регуляторы работают в ограниченном сверху и снизу диапазоне, поэтому в принципе нелинейны. Это обусловило широкое распространение методов экспериментальной настройки регулятора, подключенного к объекту управления. Прямое использование формируемой алгоритмом управляющей величины также имеет свою специфику.

Рассмотрим применение ПИД регулятора на примере простейшей системы, в которой объектом управления является простое апериодическое звено, параметры которого могут изменяться.

Реализуем стабилизацию выходного параметра посредством простого ПИД-регулятора, настройку которого выполним программными средствами среды MatLab. Структурная схема системы представлена на рис. 3.

Передаточная функция регулятора

$$W_p(p) = P + \frac{I}{p} + D \frac{N}{1 + \frac{N}{p}},$$

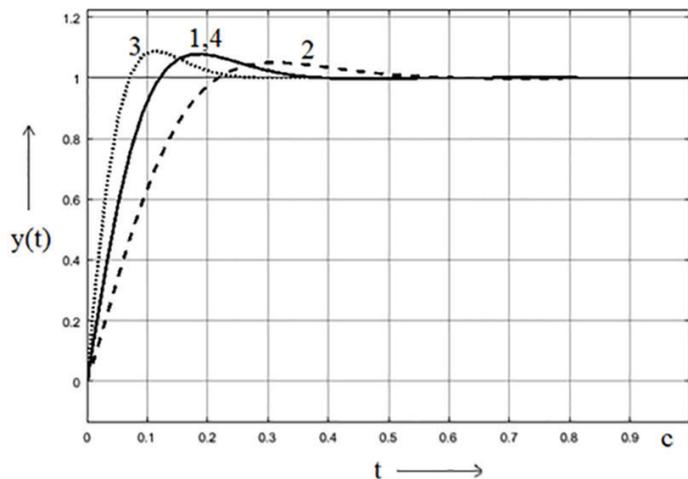


Рис. 4. Переходной процесс выходной координаты при разных настройках ПИД-регулятора

где P , I , D — коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих соответственно; N — фильтрующий коэффициент.

Настройку произведем программно, посредством инструментов, имеющихся в среде MatLab, при различных конфигурациях системы, а именно без возмущающего воздействия и с возмущающим воздействием (рис. 4).

Кривая 1 на рис. 4 соответствует реакции системы на скачок входного воздействия при типовой настройке ПИД-регулятора. Кривая 2 отражает реакцию системы на то же входное воздействие, но при наличии в системе возмущающего воздействия. Коррекция параметров ПИД-регулятора для компенсации возмущающего воздействия приводит к реакции системы на скачок входного воздействия при отсутствии возмущения в виде кривой 3.

При наличии возмущающего воздействия реакция системы на скачок входного сигнала для последнего варианта настройки ПИД-регулятора будет выглядеть в виде кривой 4.

Таким образом, вышеизложенное показывает, что при изменяющемся возмущении, которое требует компенсации, ПИД-регулятор обрабатывает управляющее воздействие несколько некорректно. Требуется постоянная подстройка коэффициентов регулятора. Данную процедуру необходимо выполнять в автоматическом режиме, чтобы не прерывать технологический процесс. Одним из возможных вариантов такой реализации приведен в [7], где в качестве корректора коэффициентов каждой составляющей регулятора предложено использовать нечеткий динамический корректор.

Такое построение регулятора требует измерение каждой составляющей ПИД-регулятора и создания базы правил нечеткого корректора для каждой составляющей.

В приведенном примере в качестве возмущения была принята сама выходная координата, что в реальности редко встречается. Однако даже в таком виде отражается существенный недостаток ПИД-регулятора — невозможность адекватной реакции регулятора при изменении структуры системы (возмущающего воздействия).

Другой подход компенсации взаимовлияния приводов друг на друга приведен в [8]. Эта задача возложена на нечеткий регулятор положения локального электропривода линейных перемещений [9].

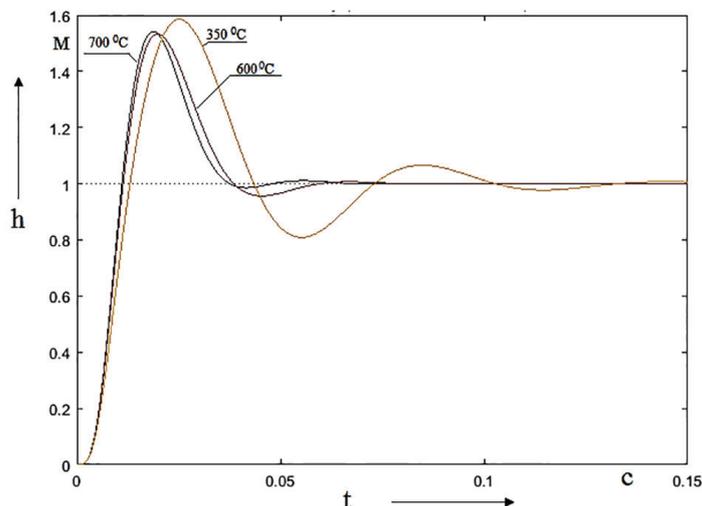


Рис. 5. Переходная характеристика системы с ПИ-регулятором при различной температуре заготовки

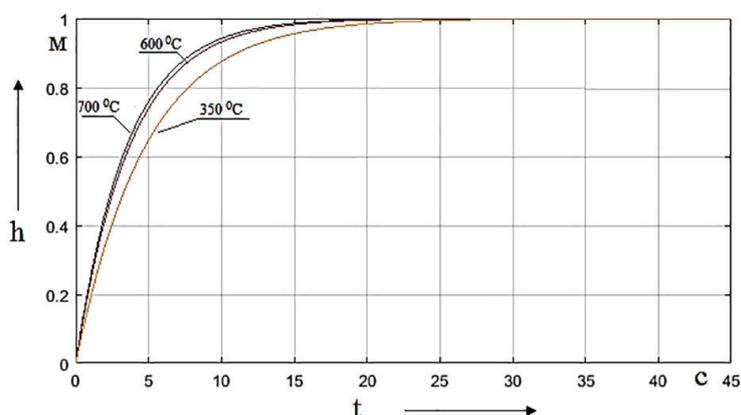


Рис. 6. Переходная характеристика системы с нечетким регулятором при различной температуре заготовки

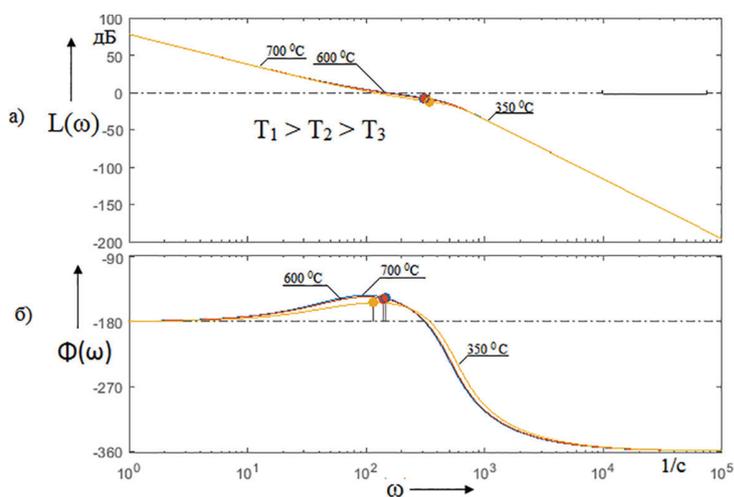


Рис. 7. Запасы устойчивости системы с ПИ-регулятором: а) по амплитуде; б) по фазе

Оценим поведение с ПИ-регулятором и нечетким регулятором, приведенным в [8] при изменении параметров системы. Применительно к системе управления процессом многоточечного формования в качестве такого параметра может

выступать, например, температура формуемой заготовки. Известно, что при снижении температуры в процессе формования повышается предел текучести и проявляется упрочнение заготовки, что ведет к существенному увеличению нагрузки [10, 11]. Т.е.

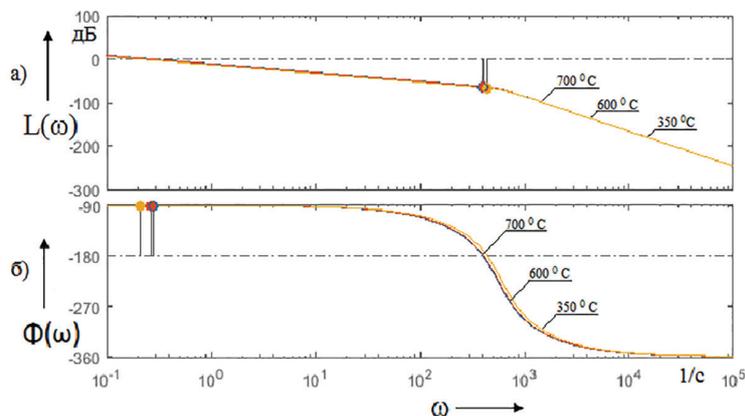


Рис. 8. Запасы устойчивости системы с нечетким регулятором:
а) по амплитуде; б) по фазе

существенным фактором, влияющим на поведение заготовки, является температура, именно поэтому рассмотрим поведение систем при её снижении. Для иллюстрации показана реакция системы управления позиционированием одного стержня (рис. 5), описанной в [1], при реализации пропорционально-интегрального закона регулирования, где в качестве возмущающего фактора выступает температура заготовки. Также приведена аналогичная характеристика, но с применением нечеткого регулирования (рис. 6) [12].

Представлены частотные характеристики системы с применением обоих типов регуляторов (рис. 7, 8).

Анализ полученных кривых моделирования показывает, что система с ПИ-регулятором с ростом нагрузки на привод обрабатывает тестовый сигнал с большим перерегулированием и временем переходного процесса. В случае же с нечеткими регуляторами система не имеет перерегулирования, хотя и время переходного процесса достаточно велико. Запас по амплитуде в обоих случаях не существенно меняется при увеличении усилия формования, однако в системе с нечеткими регуляторами этот запас несколько выше.

Ситуация с запасом по фазе несколько иная, система с ПИ-регулятором имеет невысокий запас по фазе, который с ростом нагрузки падает. В то же время система с нечетким регулятором имеет весомый запас по фазе, который с ростом нагрузки практически не меняется.

Выводы. Исходя из всего вышеизложенного, можно утверждать, что применение классических алгоритмов в системе управления процессом многоточечного формования для достижения желаемого результата требует использования дополнительных корректирующих связей и придание регуляторам адапционных свойств, что в конечном итоге значительно усложняет систему управления.

Реализация регуляторов системы управления на основе нечетких алгоритмов позволяет достичь желаемого результата. Регулятор обеспечивает работу системы с нелинейным объектом. Система управления обладает большей инерционностью по сравнению линейным аналогом, но имеет больший запас устойчивости. А принимая во внимание тот факт, что процесс формования не требует высоких скоростей, так как в случае быстрого перемещения стержня возможно появление дефектов на детали (вмятины, трещины, изломы), и учитывая, что в то же время важен контроль скорости

формования в зависимости от величины взаимовлияний от работы соседних стержней, то с данной задачей, при правильно составленной базе знаний экспертов, нечеткая система управления процессом многоточечного формования успешно справляется.

Библиографический список

1. Васильченко С. А. [и др.]. Разработка технологии и технологического оснащения изготовления монолитных крупногабаритных оребренных панелей: пояснительная записка. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во КнАГУ, 2016. 197 с.
2. Дерюжкова Н. Е., Соловьев В. А., Чжо Аунг Хтет, В. В. Тетерин. Исследование взаимосвязанной системы позиционных электроприводов стержневой установки // Электропривод на транспорте и в промышленности: тр. II Всерос. науч.-практ. конф., Хабаровск, 20–21 сент. 2018 г. / ДВГУПС. Хабаровск, 2018. С. 253–256. ISBN 978-5-262-008311-5.
3. Морговский Ю. А., Рубашкин И. Б., Гольдин Я. Г. Взаимосвязанные системы электропривода. Л.: Энергия, 1972. 201 с.
4. Морозовский В. Т. Многосвязанные системы автоматического регулирования. М.: Энергия, 1970. 288 с.
5. Воронов А. А. [и др.]. Теория автоматического управления: В 2 ч. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления / под общ. ред. А. А. Воронова. М.: Высшая школа, 1986. 367 с.
6. Менский Б. М. Принцип инвариантности в автоматическом регулировании и управлении. М.: Машиностроение, 1972. 360 с.
7. Бобко В. Д., Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А. О нечеткой динамической коррекции параметров ПИД-регулятора // Автоматрия. 1998. № 1. С. 50–55.
8. Дерюжкова Н. Е., Соловьев В. А., Чжо Аунг Хтет, В. В. Тетерин. Нечеткое управление в системе регулирования позиционных электроприводов стержневой установки // Научно-технический вестник Поволжья. 2019. № 5. С. 77–80.
9. Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев: Радиоаматор, 2008. 972 с.
10. Горбунов М. Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. 225 с.
11. Илларионов А. Г., Попов А. А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 137 с.
12. Дерюжкова Н. Е., Соловьев В. А., Чжо Аунг Хтет, В. В. Тетерин. Нечеткое управление взаимосвязанными электроприводами формующей установки // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всерос. нац. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре,

ДЕРЮЖКОВА Нелли Егоровна, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

Адрес для переписки: erapu@knastu.ru

СОЛОВЬЕВ Вячеслав Алексеевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

Адрес для переписки: erapu@knastu.ru

ТЕТЕРИН Виктор Владимирович, магистр по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Адрес для переписки: viktor96t@mail.ru

УРАСОВ Дмитрий Владимирович, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

Адрес для переписки: erapu@knastu.ru

Для цитирования

Дерюжкова Н. Е., Соловьев В. А., Тетерин В. В., Урасов Д. В. Сравнительная оценка классических и нечетких алгоритмов управления системой многоточечного формования изделий двойной кривизны // Омский научный вестник. 2020. № 2 (170). С. 52–57. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-170-52-57.

Статья поступила в редакцию 18.01.2020 г.

© Н. Е. Дерюжкова, В. А. Соловьев, В. В. Тетерин,
Д. В. Урасов