

Б. М. Готлиб, А. А. Вакалюк

НЕЧЕТКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРОРАСТЯЖЕНИЯ БАНДАЖНЫХ КОЛЕЦ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА НА ГИДРАВЛИЧЕСКОМ ПРЕССЕ УСИЛИЕМ 300 МН

Рассматривается задача автоматизации процесса гидрорастяжения бандажных колец большого диаметра на гидравлическом прессе усилием 300 МН для повышения производительности, надежности и стабильности функционирования процесса на основе применения методов нечеткой логики. В статье приведено описание процесса гидрорастяжения, поставлена задача для автоматизированной системы управления, приведены результаты разработки и моделирования автоматизированной системы управления с применением методов нечеткой логики. *База знаний; нечеткий регулятор; ассоциативные правила; функция принадлежности; гидрорастяжение; гидравлический пресс; бандажное кольцо*

При изготовлении турбогенераторов большой единичной мощности применяются бандажные кольца для укрепления лобовых частей обмоток ротора генератора. Одним из способов изготовления таких колец, обладающих необходимыми свойствами по прочности и однородности механических характеристик, является способ гидрорастяжения кольцевых заготовок, осуществляемый на мощном гидравлическом прессе. Для достижения требуемых величин пределов текучести и прочности бандажного кольца степень пластической деформации кольцевой заготовки должна достигать 50–60 % при температуре заготовки не выше 200 °С.

ПРОЦЕСС ГИДРОРАСТЯЖЕНИЯ

Процесс гидрорастяжения осуществляется на технологическом комплексе, схема которого приведена на рис. 1. Основу комплекса составляет вертикальный гидравлический пресс усилием 300 МН. Для осуществления процесса гидрорастяжения кольцевую заготовку устанавливают между двумя конусами K_1 и K_2 . При этом внутренняя поверхность заготовки BK , наружная поверхность оправки OP и боковые поверхности конусов K_1 и K_2 образуют замкнутую полость, в которую во время гидрорастяжения подается жидкость сверхвысокого давления от насоса H_2 (производительностью 2,5, ..., 7,6 л/мин). Перемещение подвижной траверсы пресса осуществляется подачей жидкости высокого давления от насоса H_1 (производительностью 50...600 л/мин) в рабочие цилиндры пресса G_1 и G_2 .

Управление процессом гидрорастяжения осуществляется путем изменения производи-

тельности насоса сверхвысокого давления H_2 и насоса высокого давления H_1 .

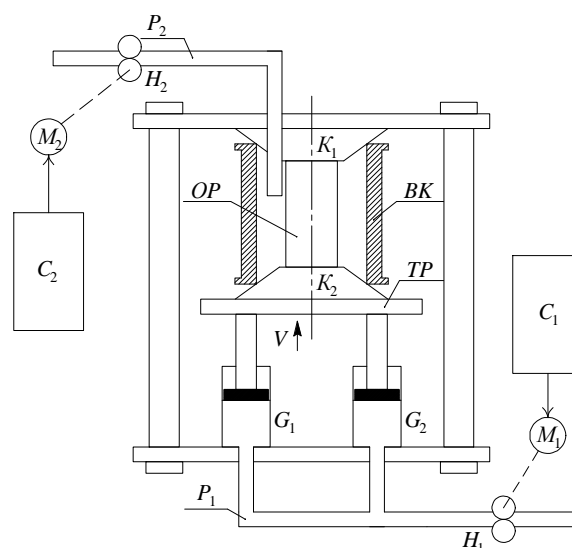


Рис. 1. Установка гидрорастяжения кольцевых заготовок: H_1 – насос высокого давления; M_1 – привод насоса H_1 ; C_1 – система управления приводом; H_2 – насос сверхвысокого давления; M_2 – привод насоса H_2 ; C_2 – система управления приводом; G_1 , G_2 – цилиндры гидропривода пресса; P_1 – магистраль высокого давления (0...320 кгс/мм²); P_2 – магистраль сверхвысокого давления (500...3000 кгс/мм²); BK – заготовка; K_1 , K_2 – конусы, TP – подвижная траверса пресса, OP – оправка

Под действием жидкости сверхвысокого давления происходит пластическая деформация заготовки, при этом конусы сжимаются усилием рабочих цилиндров пресса, обеспечивая герметичность внутренней полости. В процессе гидрорастяжения возможно появление искажения формы заготовки.

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ГИДРОРАСТЯЖЕНИЯ

Целью управления процессом гидрорастяжения является обеспечение допускаемого отклонения наружного диаметра по высоте кольца: для колец с конечным наружным диаметром менее 1500 ± 3 мм, а для колец с конечным наружным диаметром более 1500 ± 5 мм. При нарушении согласованности между движением конусов, расходом жидкости сверхвысокого давления и изменяющейся конфигурацией кольцевой заготовки происходит искажение формы заготовки типа «бочка», когда размер диаметра в средней части высоты заготовки превышает его размер по торцам заготовки, или типа «корсет» в случае превышения размера диаметра по торцам заготовки диаметра в средней ее части по высоте. При чрезмерном искажении вида «бочка» или «корсет» заготовка выбраковывается. Искражение формы типа «бочка» исправляется за счет увеличения скорости конусов, а искажение формы типа «корсет» – увеличением внутреннего сверхвысокого давления. При чрезмерном увеличении величины сверхвысокого давления, из-за недостаточного прижимного усилия конусов, может возникнуть разгерметизация внутренней полости заготовки, что является опасным событием и может привести к травме обслуживающего персонала.



Рис. 2. Область контакта конуса с заготовкой

Процесс гидрорастяжения, как и большинство металлургических процессов, является нелинейным и изменяющимся во времени [1]. Не-

линейность процесса гидрорастяжения проявляется в сложности закона регулирования скорости траверсы пресса и расхода жидкости сверхвысокого давления для ведения процесса гидрорастяжения оптимальным образом без искажения формы заготовки и с сохранением герметичности внутренней полости заготовки. Также выявлен ряд неопределенностей процесса:

- неопределенность механических свойств исходной заготовки;
- неопределенность граничных условий в области соприкосновения заготовки и конуса (непредсказуемость площади контакта конуса и заготовки и прижимных усилий для обеспечения герметичности внутренней полости заготовки) (см. рис. 2);
- неопределенность, связанная с устройствами и механизмами оборудования (наличие перетечек рабочей жидкости внутри устройств и их герметичность).

Все эти обстоятельства затрудняют реализацию управления процессом гидрорастяжения.

Для повышения эффективности работы автоматизированной системы управления процессом в условиях неопределенностей возможна интеллектуализация системы управления, например, методами нечеткой логики.

Целесообразность применения методов нечеткой логики определяется следующими соображениями [3]:

- процесс гидрорастяжения является нелинейным;
- закон регулирования скорости конусов и расхода жидкости сверхвысокого давления зависят от начальных размеров заготовки и сопротивления деформации и их непостоянства для различных заготовок;
- наличие целого ряда неопределенностей процесса гидрорастяжения на уровне исполнительных органов гидравлического пресса;
- наличие экспертных знаний оператора процесса;
- использование лингвистических переменных дает широкие возможности для оптимизации процесса управления.

Нечеткий регулятор управляет изменением расходной характеристики насоса высокого и сверхвысокого давления и составлен из набора условных лингвистических операторов и правил, задающих непосредственные операции управления. Блок-схема нечеткого регулятора представлена на рис. 3 [2].

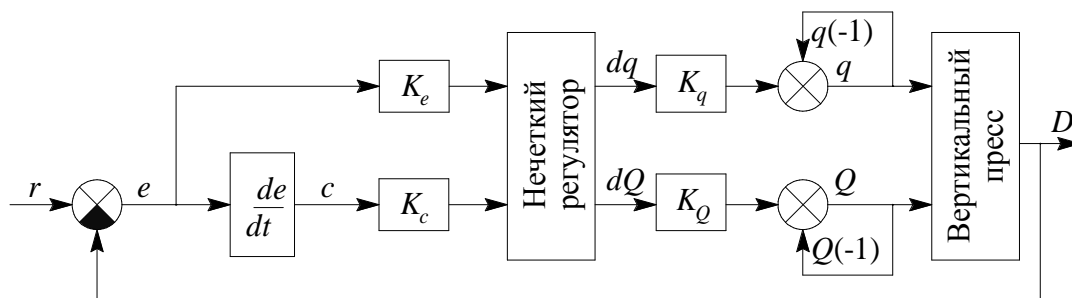


Рис. 3. Блок-схема нечеткого регулятора: e – ошибка формы заготовки, c – скорость изменения ошибки формы, q и Q – расход жидкости сверхвысокого и высокого давления соответственно, $q(-1)$ и $Q(-1)$ – расход жидкости сверхвысокого и высокого давления соответственно на предыдущем шаге, dq и dQ – изменение расхода жидкости сверхвысокого и высокого давления соответственно, K_e, K_c, K_q, K_Q – подстроечные коэффициенты

Нечеткий регулятор, получая информацию об искажении формы заготовки и скорости ее изменения от датчика геометрических размеров и формы кольцевой заготовки, вырабатывает управляющие воздействия в виде изменения производительности одновременно для насоса высокого и сверхвысокого давления. Обработка данных и выработка управляющих воздействий производится по шагам. На каждом шаге управления выработанные управляющие воздействия суммируются с управляющими воздействиями предыдущего шага. Отличительной особенностью разработанной системы управления является одновременное управление расходными характеристиками насоса высокого и сверхвысокого давления. Разработанные ранее аналоги управляли процессом гидрорастяжения путем однократной установки производительности насоса сверхвысокого давления H_2 на время всего процесса и изменением производительности насоса высокого давления H_1 .

Нечеткий регулятор разработан с использованием методов нечеткой логики. В качестве алгоритма нечеткого вывода выбран механизм Мамдани. Условные лингвистические операторы и нечеткие ассоциативные правила определены на основе [4]:

- опыта и знаний оператора процесса;
- технических сведений о протекании процесса гидрорастяжения;
- нечеткой модели объекта.

На основе опыта и знаний оператора процесса были получены некоторые из правил:

- «при искажении формы типа «бочка» необходимо повышать расход жидкости высокого давления»;

- «при искажении формы типа «корсет» необходимо повышать расход жидкости сверхвысокого давления»;
- «процесс управления предпочтительнее вести при небольшом искажении формы типа «бочка»»;
- «исправлять искажения формы типа «корсет» сложнее, чем искажение типа «бочка»».

В качестве функций принадлежности для решаемой задачи выбраны функции треугольного и трапецеидального вида (рис. 4). Все нечеткие переменные разделены на семь нечетких подмножеств. Входные нечеткие переменные (ошибка и скорость изменения ошибки диаметра заготовки) находятся в пределах $-4...4$ мм и $-0,3...0,3$ мм/с соответственно. Выходные нечеткие переменные (изменение расхода жидкости высокого и сверхвысокого давления) находятся в пределах $-100...100$ л/мин и $-1,5...1,5$ л/мин соответственно.

Основным элементом системы нечеткого управления является блок, содержащий нелинейные ассоциативные правила, которым задают конкретные ситуации управления (табл. 1). В системе используется четыре переменные: e – ошибка формы, представляющая собой разность диаметра в средней части высоты заготовки и на ее торце; c – скорость изменения ошибки формы; dQ – нечеткая управляющая переменная изменения объема закаченной жидкости высокого давления для перемещения нижней траверсы пресса и изменения ее скорости; dq – нечеткая управляющая переменная изменения объема закаченной жидкости сверхвысокого давления во внутреннюю полость заготовки. Выходом нечеткой матрицы является переменная, пред-

ставленная в виде дроби, в которой числитель – изменение расхода жидкости высокого давления dQ , а знаменатель – изменение расхода жидкости сверхвысокого давления dq .

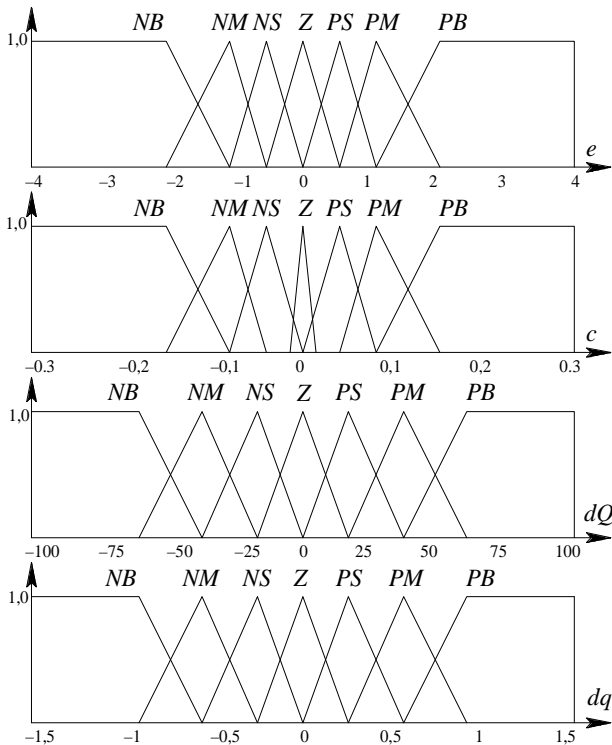


Рис. 4. Функции принадлежности для нечетких переменных: e и c – входные переменные, dQ и dq – выходные переменные

Таблица 1

Нечеткие ассоциативные правила

Ошибка формы, e

		$N3$	$N2$	$N1$	Z	$P1$	$P2$	$P3$
Скорость ошибки, c	PB		$\frac{PM}{NB}$	$\frac{PB}{NM}$	$\frac{PM}{NB}$	$\frac{PM}{NM}$	$\frac{PB}{NB}$	$\frac{PB}{NB}$
	PM	$\frac{PS}{NB}$	$\frac{PS}{NM}$	$\frac{PM}{NM}$	$\frac{PS}{NM}$	$\frac{PM}{NS}$	$\frac{PM}{NM}$	$\frac{PB}{NM}$
	PS	$\frac{Z}{NM}$	$\frac{Z}{NM}$	$\frac{PS}{NS}$	$\frac{PS}{NS}$	$\frac{PS}{NS}$	$\frac{PM}{NS}$	$\frac{PM}{NS}$
	Z	$\frac{NM}{PS}$	$\frac{NS}{PS}$	$\frac{Z}{PS}$	$\frac{Z}{Z}$	$\frac{PS}{Z}$	$\frac{PM}{Z}$	$\frac{PB}{Z}$
	NS	$\frac{NM}{PM}$	$\frac{NS}{PM}$	$\frac{NS}{PM}$	$\frac{NS}{PS}$	$\frac{NS}{PS}$	$\frac{Z}{Z}$	$\frac{Z}{Z}$
	NM	$\frac{NB}{PM}$	$\frac{NM}{PM}$	$\frac{NS}{PM}$	$\frac{NS}{PM}$	$\frac{NM}{PS}$	$\frac{NS}{PS}$	$\frac{NM}{PM}$
	NB	$\frac{NB}{PB}$	$\frac{NB}{PM}$	$\frac{NM}{PM}$	$\frac{NM}{PM}$	$\frac{NB}{PS}$	$\frac{NM}{PM}$	

изменение расхода жидкости высокого давления - dQ
 изменение расход жидкости сверхвысокого давления - dq

Для оценки и проверки функций принадлежности и базы правил построены результирующие поверхности выходных параметров dQ и dq (рис. 5 и рис. 6 соответственно) [4].

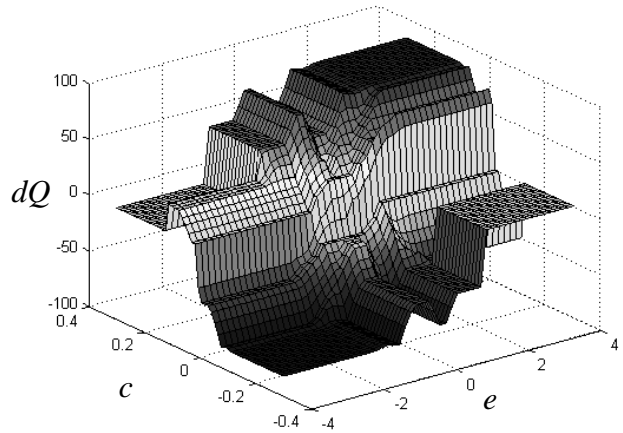


Рис. 5. Результирующая поверхность dQ

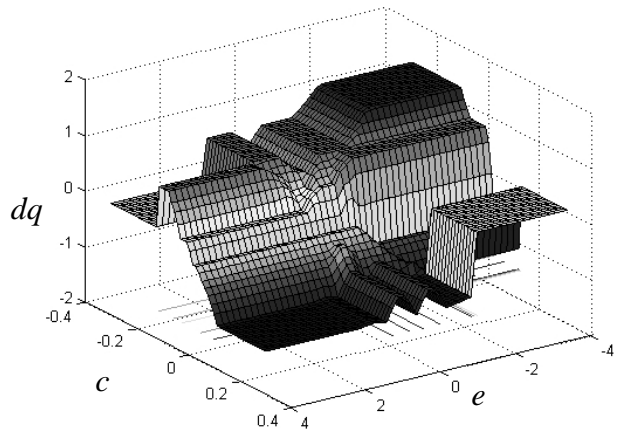


Рис. 6. Результирующая поверхность dq

РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ

На рис. 7 изображены параметры процесса гидрорастяжения. Рис. 7, а показывает искажение формы заготовки во время процесса гидрорастяжения. Рис. 7, б, в показывают изменения расходных характеристик насосов высокого и сверхвысокого давления соответственно. Во время моделирования процесса гидрорастяжения в начальный момент времени форма заготовки резко искажилась в сторону «бочки». Для устранения данного искажения формы нечеткий регулятор выработал управляющие воздействия по увеличению расхода жидкости высокого давления Q и уменьшению расхода жидкости сверхвысокого давления q . После исправления искажения формы типа «бочка» возникло искажение формы типа «корсет», которое нечеткий регулятор также устранил. После ис-

правления искажений формы процесс был приведен в равномерное состояние.

Из вышесказанного можно сделать вывод о правильной реакции системы управления на формоизменение заготовки. Работа нечеткого регулятора удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к системе управления. Правила, полученные на основе знаний и опыта оператора пресса, реализованы в работе нечеткого регулятора:

- при возникновении ошибки типа «бочка» нечеткий регулятор увеличивает расход жидкости высокого давления и уменьшает расход жидкости сверхвысокого давления;
- при появлении искажения формы типа «корсет» нечеткий регулятор вырабатывает обратные управляющие воздействия;
- при приближении искажения формы заготовки к нулевому значению нечеткий регулятор компенсирует воздействия пресса на заготовку и удерживает искажение формы заготовки, близкое к нулевому значению;
- искажение формы типа «бочка» исправляется легче и быстрее чем искажение формы типа «корсет», так как во втором случае возможна разгерметизация внутренней полости заготовки;
- процесс гидрорастяжения рекомендуется вести при «небольшом» искажении формы типа «бочка».

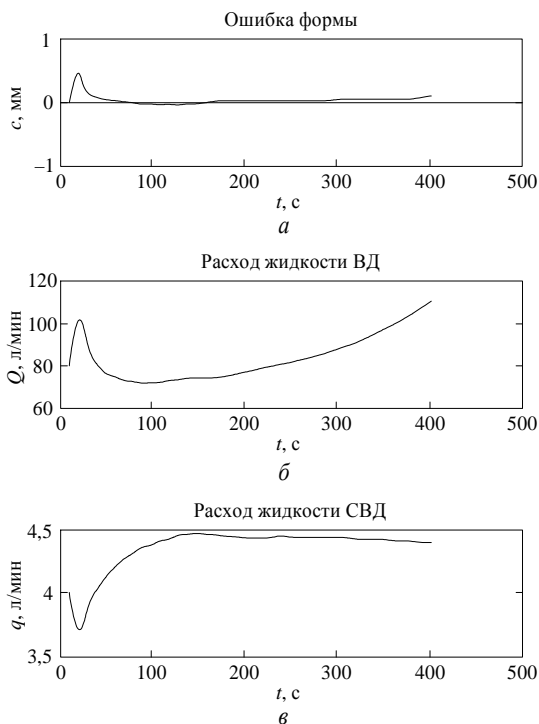


Рис. 7. Параметры процесса гидрорастяжения

На рис. 8 показана заготовка до и после процесса гидрорастяжения. Результаты численного эксперимента получены путем имитационного моделирования процесса гидрорастяжения на примере кольцевой заготовки со следующими исходными геометрическими размерами: высота – 668 мм; наружный диаметр – 977 мм; внутренний диаметр – 826 мм.

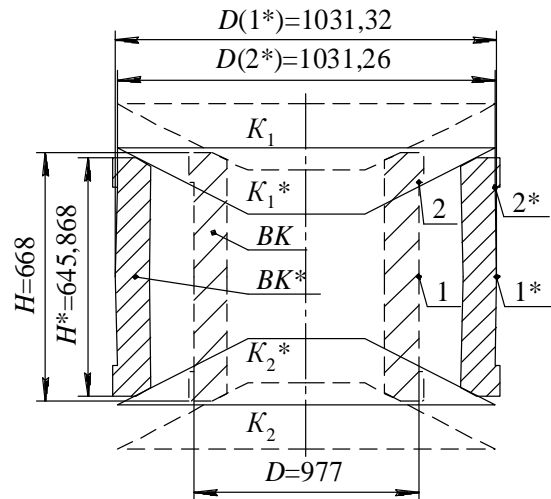


Рис. 8. Состояние заготовки в начале и конце процесса гидрорастяжения: D – внешний диаметр кольцевой заготовки; H – высота заготовки; K_1 и K_2 – верхний и нижний конусы соответственно; BK – заготовка; 1 и 2 – точка в центре и на краю цилиндрической поверхности соответственно; обозначения, содержащие «*», обозначают параметр после гидрорастяжения; штриховая линия обозначает начальное положение заготовки и инструмента

Имитационная модель построена на базе математической модели процесса гидрорастяжения [1]. Регулирование управляющих воздействий осуществляется нечетким регулятором. По итогам моделирования, искажение формы заготовки находится в пределах допустимых отклонений для данного типоразмера кольцевой заготовки ± 3 мм и составляет 0,06 в сторону «бочки». Начальное положение заготовки и конусов отмечено штриховыми линиями. Конечное положение отмечено сплошными линиями. В процессе гидрорастяжения конусы совершают поступательное вертикальное движение, при этом диаметр заготовки увеличивается с D до $D(2^*)$, а ее высота уменьшается с H до H^* . На образующей конуса заготовки отмечены две точки: 1 и 2, при помощи которых определяется искажение формы кольцевой заготовки: $D(2^*)-D(1^*)$.

Моделирование процесса производилось в системе Matlab.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ работы нечеткого регулятора, производившийся на базе имитационной модели процесса гидрорастяжения, является удовлетворительным результатом по применению методов нечеткой логики для задач управления сложными производственными процессами и процессом гидрорастяжения бандажных колец большого диаметра в частности. Результаты проведенных экспериментов являются положительными и показывают, что управления процессом при помощи нечеткого регулятора удовлетворяют поставленным задачам перед системой автоматизированного управления. Также при таком моделировании и управлении процессом гидрорастяжения становится возможным прогнозировать механические свойства по всему объему заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Готлиб Б. М., Добычин И. А., Готлиб М. Б.** Автоматизированные кузнечнопрессовые комплексы (опыт создания и эксплуатации). Екатеринбург: Изд-во УрГАПС, 1998. 647 с.
2. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И. М. Макаров [и др.]; Отделение информ. технологий и вычислит. систем РАН. М.: Наука, 2006. 333 с.
3. **Васильев В. И., Ильясов Б. Г.** Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие. М.: Радиотехника, 2009. 392 с.
4. Интеллектуальные системы управления и контроля газотурбинных двигателей / Под ред. академика С. Н. Васильева. М.: Машиностроение, 2008. 550 с.

ОБ АВТОРАХ

Готлиб Борис Михайлович, проф., зав. каф. мехатроники Уральск. гос. ун-та путей сообщения (г. Екатеринбург). Д-р техн. наук. Иссл. в обл. АСУ ТП обработки металлов давлением.

Вакалюк Андрей Александрович, асп. той же каф. Дипл. инженер (УрГУПС, 2008). Иссл. в обл. автоматизации процесса гидрорастяжения.