

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НЕЧЕТКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОЛОТНА ПРИ КАЛАНДРОВАНИИ

В.И. Божко

В статье представлен синтез автоматической системы нечеткого регулирования (АСНР) толщины полотна при каландровании на основе принципа управления по отклонению и алгоритма нечеткого управления. Рассмотрен алгоритм нечеткого вывода и работа АСНР толщины полотна при каландровании.

Проектирование автоматической системы регулирования толщины полотна при каландровании, основанное на аналитической модели процесса, является довольно сложной задачей, так как технологический процесс описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных по пространственным координатам и времени. Для определения соотношений между получаемым профилем полотна и

параметрами процесса каландрования (распределением давления, температуры, плотности, вязкости расплава полимера и т. п. в зазоре между валками) требуется применение трудоемких вычислительных методов [1]. В связи с этим наиболее целесообразным представляется синтез АСНР толщины полотна при каландровании на основе классического принципа управления по отклонению и методов нечеткого управления [2, 3].

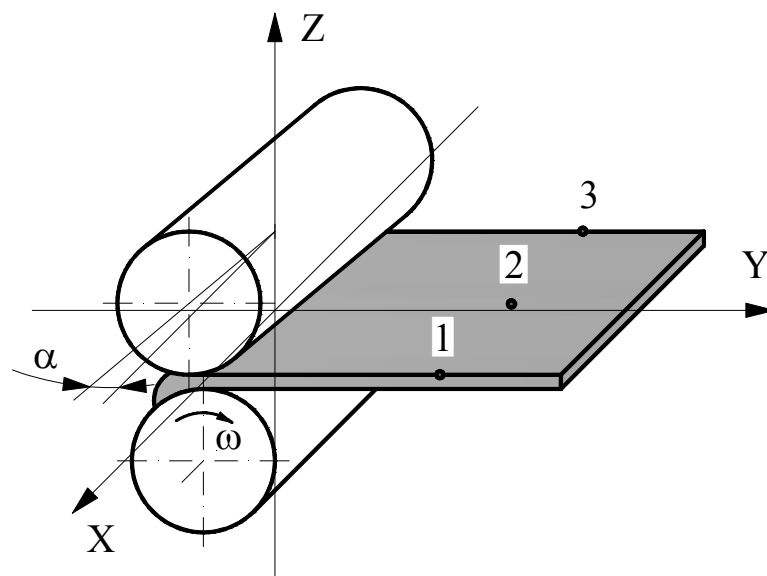


Рис. 1. Схема каландрования.

Для регулирования толщины полотна предлагаемая АСНР использует три точки измерения в направлении, перпендикулярном движению полотна (рис. 1). Измерения в крайних точках 1, 3 предназначены для регулирования толщины полотна на основе принципа управления по отклонению, в средней точке 2 — для регулирования профиля

полотна на основе методов нечеткого управления.

Для управляющих воздействий используются четыре степени свободы валка каландра: ω — вращение вокруг собственной оси, находящейся в плоскости XY; γ — поворот вокруг оси Y; L — перемещение вдоль оси Z; α — поворот вокруг оси Z. Соответственно получаем вектор управляющих

воздействий.

$$\Delta \mathbf{u} = \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \\ \Delta u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta L_1 \\ \Delta \alpha \\ \Delta L_3 \\ \Delta \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f(\varepsilon_1) \\ f_\alpha(\varepsilon_2) \\ -f(\varepsilon_3) \\ f_\omega(\Delta G) \end{bmatrix} \quad (1)$$

где $\Delta u_{1(3)} = \Delta L_{1(3)}$ – перемещение левого (правого) конца валка, что обуславливает поворот на угол $\Delta \gamma$ вокруг оси Y; $\Delta u_2 = \Delta \alpha$ – угол перекрещивания валков относительно друг друга в плоскости XY (изменение осей валков на угол $\pm \Delta \alpha$ относительно оси Z); $\Delta u_4 = \Delta \omega$ – изменение угловой скорости вращения валка; $\varepsilon_i = H_i - H_z$ – рассогласование между текущим H_i и заданным H_z значениями толщины полотна ($i=1, 2, 3$); $f(\varepsilon_i)$ – закон управления: пропорциональный (П), пропорционально-интегральный (ПИ) или пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) ($i=1, 3$).

Изменение угловой скорости вращения

валка определяется изменением производительности оборудования (ΔG) и в дальнейшем не учитывается.

Рассмотрим составление управляющего нечеткого алгоритма для информационного канала: входная лингвистическая переменная β_1 – «профиль полотна» и выходная лингвистическая переменная β_2 – «угол перекрещивания валков». Терм-множество входной лингвистической переменной β_1 – $T_1 = \{\text{«сильно вогнутый»}, \text{«умеренно вогнутый»}, \text{«немного вогнутый»}, \text{«прямоугольный»}, \text{«немного выпуклый»}, \text{«умеренно выпуклый»}, \text{«сильно выпуклый»}\}$. Терм-множество выходной лингвистической переменной β_2 – $T_2 = \{\text{«значительно уменьшить»}, \text{«умеренно уменьшить»}, \text{«немного уменьшить»}, \text{«оставить без изменения»}, \text{«немного увеличить»}, \text{«умеренно увеличить»}, \text{«значительно увеличить»}\}$. Или в символическом виде – $T_{1(2)} = \{\text{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB}\}$.

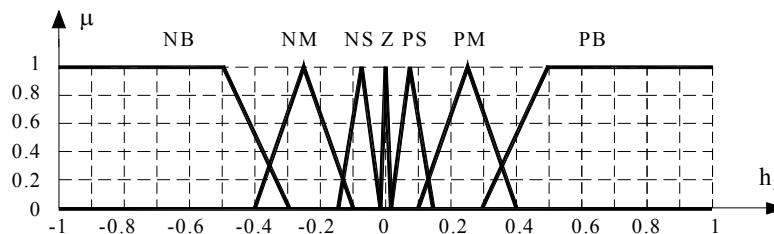


Рис. 2. Графики функций принадлежности для термов входной лингвистической переменной «Профиль полотна».

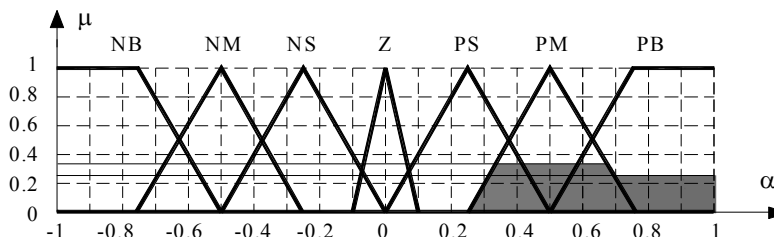


Рис. 3. Графики функций принадлежности для термов выходной лингвистической переменной «Угол перекрещивания валков».

Области определения и функции принадлежности терм-множеств лингвистических переменных β_1 и β_2 задаются кусочно-линейными функциями (рис. 2, 3) на основе экспертных оценок эксплуатации каландра и в дальнейшем уточняются в процессе работы АСНР. При этом выполнение неравенств

$$|\Delta H_i| = |H_i - H_Z| \leq \varepsilon_\delta, \quad (i=1, 2, 3)$$

определяет прямоугольный профиль полотна заданной толщины, где ε_δ – технологический допуск по толщине полотна. При $H_2 > H_Z + \varepsilon_\delta$ профиль полотна выпуклый, а при $H_2 < H_Z - \varepsilon_\delta$ – вогнутый. Выпуклость профиля полотна обусловлена действием распорных усилий между валками, возникающих при течении расплава полимера между ними. На рис. 2, 3 области определения толщины полотна h_2 и угол перекрещивания валков α заданы в относительных единицах:

$$h_2 = \frac{H_2 - H_Z}{H_Z} \quad \text{и} \quad \alpha = \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{\max}}, \quad \text{где } \alpha_{\max} -$$

максимальный угол перекрещивания валков. Тогда $\alpha > 0$ – увеличение, а $\alpha < 0$ – уменьшение угла перекрещивания. При этом предполагается, что АСНР обеспечивает выполнение в точках $i=1, 3$ заданного условия – $H_i = H_Z$ с помощью П, ПИ или ПИД законов регулирования.

Функции принадлежности $\mu_\Delta(x_T; a, b, c)$ терм-множеств NM, NS, Z, PS, PM являются «треугольными» и аналитически задаются выражением

$$\mu_\Delta(x_T; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x_T \leq a \\ \frac{x_T - a}{b - a}, & a \leq x_T \leq b \\ -\frac{x_T - c}{c - b}, & b \leq x_T \leq c \\ 0, & c \leq x_T \end{cases} \quad (2)$$

функция принадлежности $\mu_Z(x_T; a, b)$ терма NB – линейной Z-образной функцией

$$\mu_Z(x_T; a, b) = \begin{cases} 1, & x_T \leq a \\ -\frac{x_T - b}{b - a}, & a \leq x_T \leq b \\ 0, & b \leq x_T \end{cases} \quad (3)$$

функция принадлежности $\mu_S(x_T; a, b)$ терма PB – линейной S-образной функцией

$$\mu_S(x_T; a, b) = \begin{cases} 0, & x_T \leq a \\ \frac{x_T - a}{b - a}, & a \leq x_T \leq b \\ 1, & b \leq x_T \end{cases} \quad (4)$$

где x_T – элемент области определения нечетких переменных; a, b, c – некоторые числовые параметры, принимающие определенные действительные значения и упорядоченные отношением: $a \leq b \leq c$.

Система нечеткого вывода (СНВ) строится на основе нечеткого лингвистического высказывания первого вида « β_1 есть τ_T » или « β_1 IS τ_T » (τ_T – отдельный терм лингвистической переменной β) [3] и содержит следующие семь правил R (Rule N) нечетких продукций:

R 1: IF «профиль полотна сильно вогнутый» THEN «угол перекрещивания валков значительно уменьшить»;

R 2: IF «профиль полотна умеренно вогнутый» THEN «угол перекрещивания валков умеренно уменьшить»;

R 3: IF «профиль полотна немного вогнутый» THEN «угол перекрещивания валков немного уменьшить»;

R 4: IF «профиль полотна прямоугольный» THEN «угол перекрещивания валков оставить без изменения»;

R 5: IF «профиль полотна немного выпуклый» THEN «угол перекрещивания валков немного увеличить»;

R 6: IF «профиль полотна умеренно выпуклый» THEN «угол перекрещивания валков умеренно увеличить»;

R 7: IF «профиль полотна сильно выпуклый» THEN «угол перекрещивания валков значительно увеличить».

В приведенных правилах нечеткой продукции коэффициенты определенности K_{RN} по умолчанию принимаются равными 1.

Алгоритм нечеткого вывода, построенный на основе алгоритма Мамдани (Mamdani), формально определяется следующим образом [3].

1. Фаззиви́зация терм-множеств входной лингвистической переменной β_1 – «профиль полотна», т. е. установление соответствия между значением входной переменной h_2 СНВ и значением функции принадлежности $\mu_{\tau} = \mu(h_2)$ соответствующего ей терма лингвистической переменной β_1 каждого из условий вида « β_1 есть τ_{T_i} » правил 1 – 7 СНВ. Полученные значения $\mu_{\tau_j} = \mu(h_2)$ являются результатом фаззификации условия « β_1 есть τ_{T_i} ».

2. Агрегирование – определение степеней истинности по каждому из правил СНВ. Поскольку все условия правил 1 – 7 представляют собой нечеткие высказывания первого вида, то степени их истинности равны значениям $\mu_{\tau_j} = \mu(h_2)$.

3. Активизация заключений в нечетких правилах продукций. Рассматривается каждое из заключений правил СНВ. Так как заключение правила представляет собой нечеткое высказывание первого вида, то степень его истинности равна алгебраическому произведению соответствующего значения $\mu_{\tau_j} = \mu(h_2)$ на весовой коэффициент $K_{RN} = 1$, т. е. $c_{Ni} = K_{RN} \mu_{\tau_j}$. Для определения функции принадлежности $\mu'(\alpha)$ выходной лингвистической переменной β_2 используется метод

min-активизации

$$\mu'(\alpha) = \min \{c_j, \mu(\alpha)\} \quad (5)$$

4. Аккумуляция или аккумуля́рование заключений нечетких правил продукций, т.е. процедура нахождения функции принадлежности для выходной лингвистической переменной β_2 . Аккумуля́рование заключений нечетких правил продукций с использованием операции max-объединения приводит в результате к нечеткому множеству $D=A \cup B$, функция принадлежности которого определяется по формуле

$$\mu_D(\alpha) = \max \{\mu_A(\alpha), \mu_B(\alpha)\}. \quad (6)$$

5. Дефаззификация выходной лингвистической переменной β_2 – «угол перекрещивания валков» осуществляется методом центра тяжести

$$\alpha_D = \frac{\int_{\text{Min}(\alpha)}^{\text{Max}(\alpha)} \alpha \mu_D(\alpha) d\alpha}{\int_{\text{Min}(\alpha)}^{\text{Max}(\alpha)} \mu_D(\alpha) d\alpha} \quad (7)$$

где α_D – результат дефаззификации; $\text{Min}(\alpha)$ и $\text{Max}(\alpha)$ – левая и правая точки интервала носителя нечеткого аккумуля́рованного множества D .

Рассмотрим работу алгоритма для случая, когда текущее измерение в точке 2 дает результат в относительных единицах $h_2 = 0.35$.

Таблица № 1. Термы РМ, РВ и их функции принадлежности для входной лингвистической переменной «Профиль полотна».

№ R	Терм	Символическое обозначение	Функция принадлежности $\mu(h_2)$
6	умеренно выпуклый	РМ	$\mu(h_2) = \begin{cases} 0, & -1 \leq h_2 \leq 0.1 \\ 6.667h_2 - 0.667, & 0.1 \leq h_2 \leq 0.25 \\ -6.667h_2 + 2.667, & 0.25 \leq h_2 \leq 0.4 \\ 0, & 0.4 \leq h_2 \leq 1 \end{cases}$
7	сильно выпуклый	РВ	$\mu(h_2) = \begin{cases} 0, & -1 \leq h_2 \leq 0.3 \\ 5h_2 - 1.5, & 0.3 \leq h_2 \leq 0.5 \\ 1, & 0.5 \leq h_2 \leq 1 \end{cases}$

1. Фаззификация входной лингвистической переменной β_1 (рис. 2) в соответствии с (2) и (4) (табл. 1) приводит к значениям степеней истинности:

$\mu_{PM}(0.35) = 0.334$ для терма РМ и $\mu_{PB}(0.35) = 0.25$ для терма РВ.

Данные условия входят в правила нечетких продукций с номерами 6 и 7. Эти

правила являются активными и используются в текущем процессе нечеткого вывода.

2. Агрегирование условий в нечетких правилах продукции оставляет значения степеней истинности без изменения.

3. Активизация заключений в нечетких правилах продукции 6, 7 приводит к термам РМ и РВ, функции принадлежности которых изображены на рис. 3 и представлены в табл. № 2.

Таблица № 2. Множества и функции принадлежности выходной лингвистической переменной «Угол перекрещивания валков».

№ R	Терм	Множество	Функция принадлежности $\mu(\alpha)$
6	умеренно увеличить (РМ)	A	$\mu_A(\alpha) = \begin{cases} 0, & -1 \leq \alpha \leq 0.25 \\ 4\alpha - 1, & 0.25 \leq \alpha \leq 0.334 \\ 0.334, & 0.334 \leq \alpha \leq 0.667 \\ -4\alpha + 3, & 0.667 \leq \alpha \leq 0.75 \\ 0, & 0.75 \leq \alpha \leq 1 \end{cases}$
7	значительно увеличить (РВ)	B	$\mu_B(\alpha) = \begin{cases} 0, & -1 \leq \alpha \leq 0.5 \\ 4\alpha - 2, & 0.5 \leq \alpha \leq 0.563 \\ 0.25, & 0.563 \leq \alpha \leq 1 \end{cases}$

4. Аккумуляция заключений нечетких правил продукции с использованием операции мажоритарности (6) для правил 6 и 7 приводит к нечеткому множеству $D = \{\alpha \in [0.25, 1], \mu_D(\alpha)\}$, функция принадлежности которого изображена на рис. 3 заштрихованной областью и в соответствии с (6) определяется выражением

$$\mu_D(\alpha) = \begin{cases} 0, & -1 \leq \alpha \leq 0.25 \\ 4\alpha - 1, & 0.25 \leq \alpha \leq 0.334 \\ 0.334, & 0.334 \leq \alpha \leq 0.667 \\ -4\alpha + 3, & 0.667 \leq \alpha \leq 0.688 \\ 0.25, & 0.688 \leq \alpha \leq 1 \end{cases}.$$

5. Дефаззификация выходной лингвистической переменной β_2 – «угол перекрещивания валков». Применение метода центра тяжести (7) для полученной функции принадлежности $\mu_D(\alpha)$ приводит к значению, равному увеличению относительного угла перекрещивания валков приближенно на 0.625.

Расчеты, выполненные в среде MATLAB с использованием пакета расширения Fuzzy Logic Toolbox при $h_2 = 0.35$, приводят к аналогичному результату: $\alpha = 0.625$.

Таким образом, АСНР толщины полотна при каландровании работает на основе классического принципа управления по отклонению с отрицательной обратной связью и методов нечеткого управления: по измерениям в крайних точках 1, 3 происходит регулирование толщины полотна по заданным законам управления – П, ПИ или ПИД, в средней точке 2 – регулирование профиля полотна на основе алгоритма нечеткого вывода. При построении данной АСНР необходимо учитывать время запаздывания, которое равно времени транспортирования материала от зазора валков (ось X) до линии 1 – 3 точек измерения (рис. 1).

Внедрение предлагаемой АСНР позволит значительно улучшить управление процессом каландрования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тадмор, З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
2. Теория моделей в процессах управления (Информационный и термодинамический аспекты) / Б. Н. Петров [и др.]. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
3. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. / А. В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с. ISBN 5-94157-087-2.