



## АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ



### ПО для УПРАВЛЕНИЯ ТОЛЩИНОЙ КАЛАНДРОВАННЫХ ТОНКИХ МАТЕРИАЛОВ

Т.Б. Чистякова, С.И. Куликов, А.Н. Полосин, К. Колерт (СПбГТИ)

Представлен управляемый программный комплекс, настраиваемый на характеристики каландровых линий и типы материалов. Программный комплекс включает подсистему оптимального управления профилем толщины, реализованную на базе математических моделей и предназначенную для выдачи оператору информации о значениях оптимальных управляющих воздействий в штатных режимах, и подсистему промышленного интеллекта, предназначенную для формирования интеллектуальных советов оператору по управлению в нештатных ситуациях и в переходных режимах.

#### Введение

Тонкие материалы (полимерные пленки, резина, бумага), производимые на каландровых линиях, находят самое широкое применение в различных отраслях промышленности, строительстве, сельском хозяйстве и в быту человека, что обусловлено их высокими эксплуатационными характеристиками, возможностью модифицирования в нужном направлении в сочетании с широким ассортиментом, позволяющим выбирать материал с необходимыми свойствами, и приемлемой для потребителя стоимостью. Важнейшим направлением повышения эффективности производств тонких материалов наряду со снижением материо- и энергоемкости является улучшение качества выпускаемой продукции и, прежде всего, толщины и равнотолщинности каландрованного материала.

Современные каландровые производства тонких материалов характеризуются многостадийностью, частой перенастройкой оборудования и технологии на новый тип продукции, большим числом контролируемых различными способами технологических параметров, возможностью возникновения множества нештатных ситуаций в переходных режимах, сложностью принятия решений по их устранению, разнообразием способов управления качеством целевого продукта, каждый из которых влияет на комплекс физико-химических свойств материала, определяющих эффективность и конкурентоспособность производства на рынке. Так, толщина и равнотолщинность каландруемых материалов зависят от многих производственных факторов, основными из которых являются: зазор между валками каландра, величина перекоса предпоследнего вала каландра, усилие контризгиба, приложенное к последнему валку каландра, температура и равномерность нагрева валков каландра, равномерность распределения материала в питающем зазоре каландра, окружная скорость вытяжных валков. Кроме того, качество каландруемых материалов в значительной степени зависит от знаний и производственного опыта операторов, которые принимают окончательные решения по управлению.

В этих условиях для повышения эффективности управления качеством тонких материалов актуальна разработка математических моделей, позволяющих исследовать влияние различных типов управляющих воздействий на толщину и равнотолщинность и выбирать наиболее рациональные способы управления и значения управляющих воздействий, как в штатных режимах, так и при переходе производств различной конфигурации на новый тип материала или производительность. При этом необходимо учитывать квалификацию и опыт операторов по применению различных методов компенсации прогиба валков каландра (контризгибы, перекрещивание). Кроме того, при управлении в нештатных ситуациях, связанных с нарушениями качества материала, распознавание истинных причин дефектов качества и формирование советов по управлению основывается на использовании моделей представления знаний. Таким образом, весьма актуальным направлением является разработка гибридной интеллектуальной системы управления толщиной и равнотолщинностью тонких материалов в различных режимах производства, включающая математические модели и подсистему промышленного интеллекта, аккумулирующую передовой производственный опыт каландровожатых и экспертов-технологов, являющихся высококвалифицированными специалистами в данной предметной области.

#### Структура системы управления

Функциональная структура системы управления (рис. 1) состоит из двух подсистем:

- оптимального управления профилем толщины, реализованной на базе математических моделей и предназначенной для выдачи оператору информации о значениях оптимальных управляющих воздействий;
- промышленного интеллекта, реализованной на базе экспертных знаний и предназначенной для выдачи интеллектуальных советов по управлению в нештатных ситуациях, связанных с отклонениями толщины от задания, а также для помощи в принятии решений по управлению при перенастройке производства на новый тип продукции или производительность.

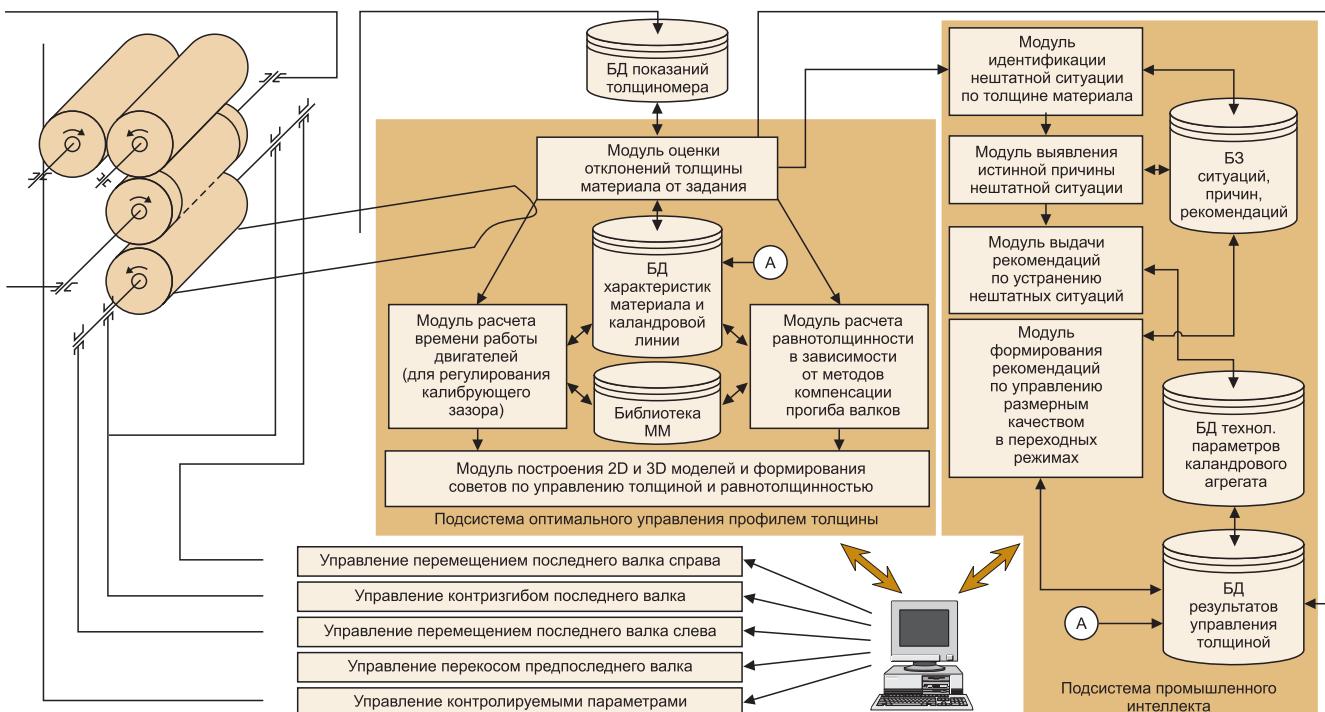


Рис. 1. Структура системы управления показателями размерного качества каландрованных тонких материалов

### Методы управления профилем толщины тонких материалов

Толщина и равнотолщинность каландрованного материала зависят от геометрических характеристик валков каландра и реологических свойств перерабатываемого материала. Для управления равнотолщинностью материала в производствах полимерной пленки, резины и бумаги используются традиционные, получившие широкое промышленное применение методы: бомбировка, перекрещивание, контризгиб валков каландра [1-4, 6]. Эти методы позволяют компенсировать прогиб валков, возникающий под действием распорных усилий в каландруемом материале и приводящий к разнотолщинности формируемого изделия. При этом бомбировка в отличие от перекрещивания и контризгиба осуществляется на стадии проектирования каландра и не может быть изменена в процессе его работы.

Толщина производимого материала регулируется калибрующим зазором каландра. Если уровень автоматизации не позволяет непрерывно измерять текущие позиции валков, образующих калибрующий зазор, тогда он регулируется с помощью времени работы электродвигателей. Время работы двигателей зависит от величины, на которую требуется изменить толщину материала [5].

Таким образом, задача управления толщиной каландрованных материалов заключается в определении времени работы двигателей  $t_b$ , регулирующих зазор между калибрующими валками каландра, которое обеспечит минимальное отклонение толщины материала от задания слева  $\Delta S^l$  и справа  $\Delta S^r$  для различных типов материалов  $X^H$  и конфигураций каландровой линии  $X^K$  при условии, что требуемые техно-

логические параметры  $X^T$  находятся в допустимых границах.

Задача управления равнотолщинностью заключается в определении значений перекоса предпоследнего вала  $x$  и усилия контризгиба последнего вала  $r$ , при которых разница между максимальной и минимальной величиной толщины изделия  $D$  по ширине полотна будет наименьшей для различных классов материалов  $X^H$  и характеристик каландровой линии  $X^K$  при условии, что требуемые технологические параметры  $X^T$  находятся в допустимых границах.

### Математическое обеспечение

Обобщенная структура математических моделей для управления показателями размерного качества тонких материалов может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} Q &= F(U, X^K, X^H, X^T), \quad Q = \{\Delta S^l, \Delta S^r, D\}, \\ U &= \{x, r, t_b\}, \quad X^K = \{w, D_a, a, b, g, E, G, J_b, J_z, h, \alpha, \beta\}, \\ X^H &= \{T_m, S_{\text{зад}}, f_b\}, \quad X^T = \{T_k, T_p, V_k, Z, V_{\text{сп}}, T_{\text{сп}}\}, \end{aligned}$$

где  $Q$  – вектор показателей качества материала,  $U$  – вектор управляющих воздействий,  $w$  – ширина валка каландра (мм),  $D_a$  – диаметр валка (мм),  $a$  – расстояние от валка до первой опоры (мм),  $b$  – расстояние от первой опоры валка до второй (мм),  $g$  – расстояние от края валка до кромки полотна материала (мм),  $E$  – модуль упругости материала валка ( $\text{Н}/\text{мм}^2$ ),  $G$  – модуль упругости второго рода материала валка ( $\text{Н}/\text{мм}^2$ ),  $J_b$  и  $J_z$  – полярные моменты инерции сечения валка и шейки валка ( $\text{мм}^4$ ),  $h$  – максимальное изменение диаметра валка в центре при бомбировке (мм),  $\alpha = f_1(w, b)$ ,  $\beta = f_2(w, b)$  – начальный и конеч-

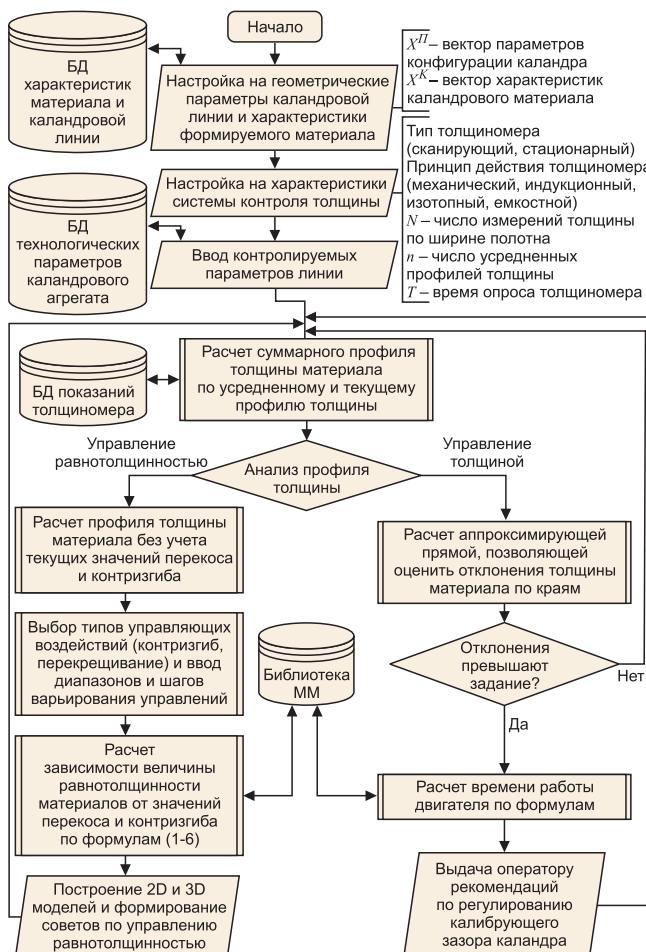


Рис. 2. Алгоритм оптимального управления толщиной и равнотолщинностью тонких материалов на базе математических моделей

ный углы бомбировки (рад),  $T_m$  – тип каландруемого материала,  $S_{зад}$  – заданная толщина материала (мм),  $f_b$  – ширина материала (мм),  $T_k$  – температура валков каландра ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_p$  – температура материала ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $V_k$  – окружная скорость валков каландра (мм/мин),  $Z$  – запас материала в питающем зазоре каландра,  $V_{ee}$  – окружная скорость съемно-вытяжных валков (мм/мин),  $T_{ee}$  – температура съемно-вытяжных валков ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Анализ литературы, посвященной расчету методов обеспечения равнотолщинности тонких материалов, формируемых на каландровых линиях, показал, что математические модели, описывающие зависимость толщины материала от рассмотренных управляемых воздействий в производствах полимерных пленочных материалов и резины, имеют следующий вид [1, 2]:

$$S_{nep} = \left[ \sqrt{\left( x \cdot \frac{f_b}{w} \right)^2 + D_a^2} - D_a \right] \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{z}{f_b} \right)^2, \quad (1)$$

$$S_{контр} = \frac{r \cdot b}{2 \cdot E \cdot J_b} \cdot \left[ z^2 - z \cdot f_b - a \cdot \left( f_b + \frac{J_b}{J_z} \cdot a \right) \right], \quad (2)$$

$$S_{бомб} = \frac{h}{1 - \sin \alpha} \cdot \left\{ \sin \left[ \alpha + \frac{\beta - \alpha}{w} \cdot \left( z + \frac{w - f_b}{2} \right) \right] - \sin \alpha \right\}, \quad (3)$$

где  $z$  – линейная координата, отсчитываемая по ширине листа от его края (мм),  $S_{nep} = S_{nep}(z)$  – функция зависимости толщины материала по его ширине от величины перекоса (мм),  $S_{контр} = S_{контр}(z)$  и  $S_{бомб} = S_{бомб}(z)$  – функции зависимости толщины материала от величины контризгиба и бомбировки (мм),  $x$  – величина перекоса предпоследнего валка каландра (мм),  $r$  – величина усилия контризгиба последнего валка (Н).

В процессе каландрования внешний калибрующий валок прогибается под действием распределенной нагрузки, которая представляет собой суммарное давление, производимое на последний валок каландра другими валками. Если при управлении равнотолщинностью материала имеется измеренное значение нагрузки, то относительно ее рассчитываются управляющие воздействия (контризгибы, перекрещивание).

Для расчета влияния распределенной нагрузки на профиль толщины полимерного материала используется следующая модель:

$$S_q = \frac{q \cdot f_b}{24 \cdot E \cdot J_b} \cdot \left[ \frac{z^4}{f_b} - 2 \cdot z^3 - 6 \cdot (a + g) \cdot z^2 + (6 \cdot f_b \cdot a + 6 \cdot f_b \cdot g + f_b^2) \cdot (z + g + a) + 4 \cdot \left( g^3 + 3 \cdot a \cdot g^2 + 3 \cdot a^2 \cdot g + \frac{J_b}{J_z} \cdot a^3 \right) \right], \quad (4)$$

где  $q$  – распределенная нагрузка (Н/мм),  $S_q = S_q(z)$  – функция зависимости толщины материала от величины нагрузки (мм).

Для расчета оптимального значения перекрещивания внутреннего калибрующего валка, компенсирующего прогиб в центре, в каландровом производстве резины при известных значениях распределенной нагрузки используется следующая математическая модель [7]:

$$x = \sqrt{2 \cdot D_a \cdot (\Delta S_p^{посл} + \Delta S_p^{предпосл})}, \quad (5)$$

где  $\Delta S_p^{посл}$  – величина прогиба последнего валка в центре под действием распорного усилия (мм),  $\Delta S_p^{предпосл}$  – величина прогиба предпоследнего валка в центре под действием распорного усилия (мм).

Прогиб каждого из валков рассчитывается по формуле:

$$\Delta S_p = \frac{q \cdot w^2}{8} \left[ \frac{w \cdot (12 \cdot L - 7 \cdot f_b)}{48 \cdot E \cdot J_b} + \frac{1}{G \cdot F} \right], \quad (6)$$

где  $L$  – расстояние между подшипниками валков (мм),  $F$  – площадь поперечного сечения валка (мм<sup>2</sup>).

Настройка математических моделей (1-6) на производство конкретного типа тонкого материала (пленки или резины) осуществляется путем изменения значений параметров характеризующих, свойства материала. Расчет зависимости разнотолщинности тонкого материала от перекрещивания и контризгиба осуществляется по модели, учитывающей информацию о текущем измеренном на производстве профиле толщины.

Адекватность приведенных математических моделей проверена при управлении толщиной и равнотолщинностью полимерной пленки на основе поли-

винилхлорида (ПВХ) и полипропилена, производимой на четырехвалковом каландре. Следует отметить, что эти модели могут также использоваться при производстве на каландах другой конфигурации, причем как полимерной пленки, так и резины.

На основе рассмотренных выше управляющих воздействий и их моделей разработан алгоритм для оптимального управления толщиной и равнотолщинностью тонких материалов, который позволяет найти управляющие воздействия, обеспечивающие минимум разнотолщинности материала (рис. 2).

### Подсистема промышленного интеллекта

Интеллектуальная подсистема базируется на производственно-фреймовой модели представления знаний и работает в режимах:

1. управления, когда в фоновом режиме проверяется соответствие толщины и равнотолщинности заданным границам. При нарушении данных условий оператор каландровой линии получает сообщение о возникновении нештатной ситуации, причинах ее появления и рекомендации по устранению;

2. обучения оператора, когда на основе базы знаний оператор имеет возможность, выбирая ситуацию, связанную с отклонением толщины или равнотолщинности от задания, получить все возможные причины появления отклонений и рекомендации по их устранению;

3. обучения системы, когда в БД результатов управления толщиной и равнотолщинностью сохраняются наилучшие значения управляющих воздействий и достигнутые при них показатели качества материала.

### Программное обеспечение

Для практической реализации предложенных математических моделей и алгоритмов управления в инструментальной среде Borland C++ Builder 6.0 разработано ПО, позволяющее: рассчитывать оптимальные значения управляющих воздействий, при которых отклонение толщины от задания будет минимальным (калибрующий зазор или время включения электродвигателей); рассчитывать на основе трехмерной модели оптимальные значения управляющих

воздействий (перекрещивание и контризгиб), при которых разнотолщинность будет минимальной; получать информацию о возникшей нештатной ситуации, причинах ее появления и действиях по устранению; выбирать оптимальные значения управляющих воздействий при перенастройке системы на новый тип материала или производительность.

Модели для управления равнотолщинностью представляются оператору в виде двумерных и трехмерных графиков. Это связано с тем, что не все операторы имеют соответствующую квалификацию и не могут эффективно управлять равнотолщинностью, используя сразу оба управляющих воздействия. Поэтому для них будет проще работать с двумерными графиками, на которых отображается зависимость равнотолщинности материала от одного из выбранных управляющих воздействий (контризгиб или перекрещивание).

Разработанное ПО протестировано на каландровом производстве пленки для различных типов полимерных материалов. Результаты тестирования подтвердили работоспособность предложенных математических моделей и алгоритмов управления толщиной и равнотолщинностью.

### Список литературы

1. Колерт К., Воскресенский А.М., Красовский В.Н. Интенсификация процессов каландрования полимеров // Химия. 1991.
2. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) // Там же. 1977.
3. Крыжановский В.К., Кербер М.Л., Бурлов В.В. Производство изделий из полимерных материалов // Профессия. 2004.
4. Мартин Дж., Смит В. Производство и применение резинотехнических изделий // Там же. 2006.
5. Куликов С.И., Чистякова Т.Б., Баранов С.А. Информационно-управляющая система для регулирования толщины и равнотолщинности полимерной пленки // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-17): Сб. тр. XVII Межд. науч. конф. 2004. Т.10.
6. Кондрашкова Г.А., Леонтьев В.Н., Шапоров О.М. Автоматизация технологических процессов производства бумаги // Лесная промышленность. 1989.
7. Карпов В.Н. Оборудование предприятий резиновой промышленности // Химия. 1987.

**Чистякова Тамара Балабековна** — д-р техн. наук, профессор, чл.-кор. Междунар. акад. "Информация, связь, управление в технике, природе, обществе", зав. кафедрой,  
**Куликов Сергей Иванович** — аспирант, **Полосин Андрей Николаевич** — канд. техн. наук,  
 старший преподаватель кафедры систем автоматизированного проектирования и  
 управления Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

**Колерт Кристиан** — канд. техн. наук,  
 почетный профессор Санкт-Петербургского государственного технологического института, главный специалист  
 по научно-техническому развитию международной корпорации "Клекнер Пентапласт ГмбХ & Ко. КГ".

Контактный телефон/факс (812) 316-18-26. E-mail: [sapr@ws01.sapr.ru](mailto:sapr@ws01.sapr.ru).

Уважаемые читатели! Продолжается подписка на журнал "Автоматизация в промышленности" на 2007 г.

Оформить подписку Вы можете:

В любом почтовом отделении

Индексы в каталоге "Роспечать" – 81874,  
 в Объединенном каталоге "Пресса России" – 39206

В редакции и

Сети Интернет по адресу: [www.avtprom.ru](http://www.avtprom.ru)