

М. М. ФОЗИЛОВ, Т. Б. ЧИСТЯКОВА, А. Н. ПОЛОСИН

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург)

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРУДЕРАМИ В МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

Описана система поддержки принятия решений, помогающая операторам решать задачу ресурсосберегающего управления экструдерами различных типов, применяемыми в производствах многоассортиментных упаковочных полимерных пленок. Она включает подсистему интеллектуального анализа промышленных данных для прогнозирования состояния экструдеров и качества пленки, подсистему оценки работоспособности экструдеров.

Введение. Современные системы управления технологическими процессами, в том числе системы ресурсосберегающего управления, решают задачи управления в основном на основе информации о параметрах состояния технологического процесса. Однако в производственных системах, в которых используется конструктивно сложное дорогостоящее и часто перенастраиваемое технологическое оборудование, ключевую роль играет состояние этого оборудования, которое во многом определяет производительность процесса и качество выпускаемой продукции. Примерами таких систем являются многоассортиментные крупнотоннажные (~1000 кг/ч) непрерывные экструзионные и экструзионно-каландровые производства одно- и многослойных полимерных пленок (ПП), применяемых для упаковки пищевых продуктов и фармацевтических препаратов. Перенастройка производственных линий на различные типы ПП, отличающиеся числом и типами материалов барьерных и структурных слоев, толщиной, шириной, цветом, и производительность происходит в среднем 30 раз в месяц (диапазон времен выполнения заказов в зависимости от их объема составляет от нескольких часов до нескольких суток). Многоассортиментный характер производства определяет необходимость применения для плавления, нагрева, перемешивания и предварительного формования полимерных композиций экструдеров различных типов: одношнековых (шнек которых только вращается), осциллирующих (шнек которых одновременно с вращением совершает осевое возвратно-поступательное движение), двухшнековых (шнеки которых вращаются в одну сторону или навстречу друг другу и находятся во взаимном зацеплении). В процессе эксплуатации происходит естественный износ экструзионного оборудования, что требует проведения периодической чистки и профилактического ремонта для поддержания оборудования в рабочем состоянии. Однако досрочная остановка линии для чистки или ремонта приводит к уменьшению объема производимой ПП и, как следствие, к задержке сроков выполнения заказов. Просроченная чистка или ремонт экструдеров приводит к получению большого количества некондиционной ПП и брака (например, к появлению на поверхности ПП черных точек, желто-коричневых деструкционных полос, включений нерасплавленного полимера, геликов). Поэтому своевременная диагностика состояния и техническое обслуживание экструзионного оборудования позволяют сократить время простоев производственных линий (одни сутки простоя одной линии приносят около 3 млн руб. убытков из-за непроизведенной ПП массой ~24000 кг), снизить себестоимость выпускаемой продукции и, кроме того, предотвратить появление более серьезных неисправностей (например, отказ редуктора привода шнека или блока упорных подшипников), требующих проведения длительного и дорогостоящего ремонта. Таким образом, актуальной для производств ПП задачей является разработка эффективного компьютерного инструмента поддержки принятия решений операторов по управлению экструдерами с учетом их фактического состояния, что позволяет сократить время принятия управленческих решений, увеличить временные периоды между остановками оборудования, повысить производительность и уменьшить невозвратные отходы.

В связи с этим предлагаемый доклад посвящен разработке перенастраиваемой на характеристики производства ПП системы поддержки принятия решений (СППР), которая позволяет на основе методов интеллектуального анализа больших промышленных данных и математических моделей (ММ) для оценки неконтролируемых на производстве параметров, характеризующих работоспособность экструзионного оборудования, решать задачу ресурсосберегающего управления экструдерами различных типов в многоассортиментных производствах ПП.

Постановка задачи ресурсосберегающего управления экструдерами. Архитектура СППР. Информационное описание процесса экструзии как объекта управления представляется в виде совокупности векторов входных параметров $X(t)$, управляющих воздействий $U(t)$ и выходных параметров $Y(t)$: $Y(t) = \Phi(X(t), U(t))$, $t \in [t_0; t_K]$. Вектор входных параметров $X(t) = \{ T_{film}(t) - \text{тип ПП}; M_{extj}(t) - \text{марка } j\text{-го экструдера, определяемая типом экструдера, диаметром и относительной длиной его шнека, } j = 1, \dots, n_{ext}(t); n_{ext}(t) - \text{число экструдеров, применяемых на стадии подготовки экструдата (определяется числом слоев производимой ПП); } U_{0j}(t), U_j(t) - \text{номинальное и текущее напряжение на электродвигателе привода шнека } j\text{-го экструдера, В; } S_{0j}(t), N_{sj}(t) - \text{номинальное скольжение и синхронная частота вращения (мин}^{-1}\text{) ротора электродвигателя; } k_j(t) - \text{коэффициент загрузки электродвигателя; } \tau_0(t) - \text{срок службы изоляции электродвигателя при номинальном напряжении и нагрузке, ч; } n_{ff}(t) - \text{число отказов } j\text{-го экструдера; } \tau_{jl}(t) - \text{время нормальной работы } j\text{-го экструдера между } (l-1)\text{-м и } l\text{-м отказами (наработка между отказами), ч; } v_{mdj}(t) - \text{скорость вибрации корпуса привода экструдера, мм/с}. \}$ Вектор управляющих воздействий $U(t) = \{ N_j(t) - \text{частота вращения шнека } j\text{-го экструдера, мин}^{-1}; T_{bjk}(t) - \text{температура корпуса в } k\text{-й тепловой зоне, } ^\circ\text{C; } n_{Tj}(t) - \text{число тепловых зон корпуса; } T_{djQ}(t) - \text{температура экструзионной головки в } q\text{-й тепловой зоне, } ^\circ\text{C; } n_{dj}(t) - \text{число тепловых зон головки} \}$. Вектор выходных параметров $Y(t) = \{ G_j(t) - \text{производительность } j\text{-го экструдера, кг/ч; } T_{ej}(t) - \text{температура экструдата, } ^\circ\text{C; } Q_{film}(t) - \text{вектор показателей качества (потребительских характеристик) ПП (число черных точек, деструкционных полос, включений нерасплавленного полимера, геликов на заданной площади полотна ПП); } P_j(t) - \text{вероятность безотказной работы } j\text{-го экструдера; } \tau_j(t) - \text{срок службы изоляции электродвигателя при текущем напряжении и нагрузке, ч; } h_j(t) - \text{количество гармоник в сигнале о вибрации} \}$.

На основе информационного описания сформулирована задача ресурсосберегающего управления экструзионным оборудованием, заключающаяся в следующем:

для заданных входных параметров $X(t)$ варьированием управляющих воздействий в регламентных диапазонах $U(t) \in [U^{\min}(t); U^{\max}(t)]$ определить их значения $U^*(t)$, обеспечивающие максимальную производительность экструзионной линии и заданное качество поверхности ПП

$$G(X(t), U^*(t)) = \max_{\text{var } U(t) \in [U^{\min}(t); U^{\max}(t)]} G(X(t), U(t)), Q_{film}(X(t), U^*(t)) \leq Q_{film}^{\max}(t) \quad (1)$$

при условии обеспечения требуемых параметров работоспособности экструдеров

$$P_j(t) \geq P^{\min}(t), \tau_j(t) \geq \tau_0(t), \quad (2)$$

где: $G(t) = \sum_{j=1}^{n_{ext}(t)} G_j(t)$; $Q_{film}^{\max}(t)$ – вектор предельно допустимых (для заданного типа ПП) значений числа поверхностных дефектов ПП различных видов; $P^{\min}(t)$ – минимально допустимая вероятность безотказной работы экструдеров.

Для решения поставленной задачи разработана СППР, которая включает следующие компоненты: подсистему интеллектуального анализа промышленных данных; подсистему оценки работоспособности экструзионного оборудования; информационную подсистему; подсистему визуализации контролируемых и рассчитываемых данных; модуль редактирования баз данных; интерфейсы лица, принимающего решение (оператора экструдера) и администратора.

Подсистема интеллектуального анализа промышленных данных позволяет прогнозировать производительность экструдеров, температуру экструдата, параметры состояния экструзионного оборудования и показатели качества ПП. Для прогнозирования используются такие методы интеллектуального анализа данных, как метод главных компонент и множественная линейная регрессия. Для определения типов поверхностных дефектов ПП (черные точки, гелики и

др.) и числа дефектов каждого типа реализован модуль цифровой обработки изображений ПП на созданном кроссплатформенном языке программирования ImageScript [1].

Подсистема оценки работоспособности экструзионного оборудования содержит библиотеку ММ для расчета вероятностей безотказной работы и отказов экструдера, срока службы изоляции электродвигателей экструдеров в зависимости от отклонения напряжения и спектрального анализа сигналов о вибрациях экструдеров.

Модуль мониторинга вибрации экструдера позволяет предупредить оператора о возникновении в подшипниках электродвигателя экструдера трещин или поломке зубчатых колес, что помогает предотвратить возникновение более серьезных проблем в электродвигателе. Своевременное получение информации о состоянии электродвигателя экструдера позволяет свести к минимуму время простоя экструдера, а также стоимость ремонта. Для спектрального анализа сигналов о вибрациях в СППР используется быстрое преобразование Фурье [2, 3]. Оно позволяет преобразовать входной сигнал $f[n]$, $n = 0, \dots, N-1$ в спектр соответствующего сигнала:

$$F[k] = \sum_{n=0}^{N-1} f[n] \exp\left(-i2\pi k \frac{n}{N}\right), \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (3)$$

где: $N = 2^m$, $m = 0, \dots, N-1$ – количество значений сигнала, измеренных за заданный период времени; k – частота k -го сигнала.

Информационная подсистема, взаимодействующая с подсистемой интеллектуального анализа и подсистемой моделирования, включает базу данных характеристик типов ПП и марок экструдеров, базу статистических данных по отказам экструдеров, базу данных контролируемых технологических параметров процесса экструзии и показателей качества ПП, базу данных контролируемых и рассчитываемых параметров состояния экструдеров.

Подсистема визуализации данных позволяет строить тренды технологических параметров процесса экструзии, параметров состояния экструзионного оборудования и показателей качества ПП за заданный интервал времени, отображать вычисленные значения характеристик работоспособности экструдеров.

Тестирование работы СППР выполнено по данным стадии подготовки экструдата промышленного экструзионно-каландрового производства однослойной плоской жесткой ПП на основе поливинилхлорида для упаковки лекарственных средств за месяц производства на заводе в России и промышленного экструзионного производства многослойной рукавной гибкой ПП на основе полиэтилена низкой плотности для упаковки мяса и мясных продуктов за неделю производства (2,49 млн. числовых значений для 418 контролируемых технологических параметров процесса созкструзии на 11 одношнековых экструдерах, подключенных к формирующей головке) на заводе в Германии.

Заключение. Разработана гибкая проблемно-ориентированная СППР для ресурсосберегающего управления экструдерами различных типов в многоассортиментных производствах ПП, ядром которой являются подсистема интеллектуального анализа больших промышленных данных и подсистема оценки характеристик работоспособности экструзионного оборудования. Результаты тестирования по данным промышленных производств на заводах в России и Германии подтвердили работоспособность СППР и возможность ее использования в качестве эффективного компьютерного инструмента для ресурсосберегающего управления экструдерами.

Работа проводилась при поддержке гранта Германской службы академических обменов DAAD (Стипендиальная программа им. Л. Эйлера для молодых российских ученых)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фозилов М.М., Чистякова Т.Б., Полосин А.Н.** Программный комплекс для цифровой обработки изображений полимерных пленок с помощью кроссплатформенного языка ImageScript. *Известия АН Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук.* 2018. № 3. С. 28–35.
2. **Kumar V.R., Vara Prasad P.V., Diwakar D.** Detection of Gear Fault Using Vibration Analysis. *International Journal of Research in Engineering and Science.* 2015. Vol. 3. № 2. P. 1–9.
3. **Sonawane P.B., Kharate N.K.** Fault Diagnosis of Windmill by FFT Analyzer. *International Journal of Innovations in Engineering and Technology.* 2014. Vol. 4. № 4. P. 47–54.

M.M. Fozilov, T.B. Chistyakova, A.N. Polosin (St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), St. Petersburg)

Decision Support System for Resource-Saving Control of Extruders at Multi-Assortment Productions of Polymeric Films

A decision support system is described that helps operators to solve the problem of resource-saving control of various types of extruders used in the production of multi-assortment packaging polymer films. It includes an industrial data mining subsystem to predict the condition of extruders and film quality, and a subsystem for evaluating the health of extruders.