

## ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ КРИТЕРІЇВ УПРАВЛІННЯ БАГАТОСТАДІЙНИМ ПРОЦЕСОМ ЕКСТРУЗІЇ

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

*Досліджено виробничий процес виготовлення полімерних виробів у черв'ячному екструдері з метою створення системи оптимального управління. Запропоновано інтегральний критерій оптимальності для цього процесу, який визначає витрати електроенергії та сировини на одиницю готової продукції. Загальний критерій розкладено на інтегральні критерії для кожного етапу з урахуванням їх особливостей. Виконано перехід від інтегральних критеріїв до таких, що формулюються у значеннях технологічних змінних, які можна оперативно вимірювати.*

**Ключові слова:** критерій управління, екструзія, продуктивність роботи, оптимальне управління.

### Вступ

Основними апаратами хіміко-технологічної системи (ХТС), яка дозволяє виготовляти такі вироби з полімерів, як труби, листи, плівки, профільні смуги, кабельні оболонки тощо, є черв'ячні екструдери різних типів. Розрізняють чотири етапи виробничого циклу експлуатації екструдера [1, 2]: розігрівання корпусу екструдера; пуск (підготовка до нормального, тобто робочого функціонування); нормальне функціонування; завершення процесу екструзії перед зупинкою обладнання.

Складність розробки оптимального управління цією ХТС пояснюється тим, що етапи мають суттєві відмінності як з точки зору мети, так і засобів управління ними [1]. Актуальним є узгодження задач управління всього виробничого циклу.

### Постановка задачі дослідження

Дослідження спрямоване на структурування задач управління черв'ячним екструдером для виробничого циклу у цілому та на різних його етапах і формування відповідної системи критеріїв управління, що забезпечать економічну ефективність виробництва та задану якість продукції.

### Основна частина

Дослідження доцільно почати з розгляду економічних показників роботи технологічної системи. У першу чергу, до них належить прибуток  $I$ , який визначимо за формулою

$$I = P_{pr} \cdot G_{pr} - Ch, \quad (1)$$

де  $P_{pr}$  — ціна одиниці продукції номінальної якості, грн/кг (метр, штук) (у дужках наведено альтернативні масі одиниці кількості продукції — метр та штуки, оскільки кількість залежить від типу продукції);  $G_{pr}$  — кількість виробленої продукції відповідної якості за певний час, кг (метр, штук);  $Ch$  — витрати на виробництво за той самий час, грн.

Ціну продукції можна визнати на деякий час сталою величиною для певної продукції, яка не вплине на вибір вектора керувань.

Витрати на виробництво  $Ch$  складаються з експлуатаційних  $Ch_{op}$  та загальних  $Ch_g$  витрат, тобто:

$$Ch = Ch_g + Ch_{op}.$$

Зупинимось на експлуатаційних витратах  $Ch_{op}$ , які на відміну від загальних, тісніше пов'язані з поточними умовами процесів. До них зазвичай відносять експлуатаційні трудо-, енерго- та матеріальні витрати ( $Ch_w$ ,  $Ch_e$  та  $Ch_m$ , відповідно):

$$Ch_{op} = Ch_w + Ch_e + Ch_m. \quad (2)$$

Розглянемо фактори, які формують енерго- та матеріальні витрати. До  $Ch_e$  віднесемо енерговит-

рати на переміщення сировини в екструдер,  $W_m$ , на підтримування заданих температур у зонах екструдера,  $W_\Theta$  та на переміщення матеріалу у корпусі екструдера за рахунок обертання шнека,  $W_a$ :

$$Ch_e = P_e W_e = P_e (W_m + W_\Theta + W_a), \quad (3)$$

де  $P_e$  — тариф на електроенергію;  $W_e$  — витрати електроенергії.

Матеріальні витрати визначимо так:

$$Ch_m = P_m G_m, \quad (4)$$

де  $P_m$ ,  $G_m$  — ціна та витрата сировини, відповідно.

Питома собівартість процесу екструзії  $P_{pr}$  базується на витратах  $Ch_{op}$ , віднесених на одиницю виробленої продукції і враховує, таким чином, можливість браку в ході роботи обладнання

$$P_{pr} = Ch_{op} / G_{pr}. \quad (5)$$

Розглянемо можливі технологічні критерії.

*Продуктивність роботи екструдера*,  $G_{pr}$  — часто застосовують як самостійний критерій, а також уводять до складу інших критеріїв керування, наприклад, до (1) і (5). Для визначення цього критерію потрібно менше даних, але він відображає роботу технологічної системи не повною мірою — враховує тільки здобутки.

Деякі автори пропонують складені технологічні критерії [3], які містять комбінації відхилень деяких технологічних показників від їхніх номінальних значень. Такі критерії, зазвичай, містять дані, які вимірюють автоматично, вони прості для розрахунків, але не всебічно характеризують процеси і не несуть смислового навантаження. Якість продукції розглядають, в основному, не як критерії, а як обмеження в задачах оптимізації або не розглядають зовсім.

Оскільки досліджувана ХТС може виробляти й мати браковану продукцію, то головною задачею при створенні пластмасових виробів визначимо *мінімізацію витрат на виготовлення одиниці готової продукції за виконання вимог до її якості*. Під готовою продукцією розумітимемо ту, яка відповідає встановленим вимогам і є товаром (не бракованою). Для спрощення задачі оперативної оптимізації будемо зважати на трудовитрати тільки оперативного персоналу, тобто тих людей, які можуть змінювати керувальні змінні (далі — оператори-технологи).

Отже, за критерій автори вибрали показник, що впливає з (5), а саме

$$K_{opt} = (Ch_w + Ch_e + Ch_m) / G_{pr}. \quad (6)$$

Математично сформулюємо загальну задачу оптимального керування процесом екструзії так:

$$K_{opt} \rightarrow \min;$$

$$\Omega_{bot} \leq \Omega \leq \Omega_{over}, \quad (7)$$

де  $\Omega$ ,  $\Omega_{bot}$ ,  $\Omega_{over}$  — вектор поточних значень технологічних змінних, вектор нижніх та верхніх допустимих значень цих змінних, відповідно.

Розглянемо спосіб відображення загального критерію (6) на окремі етапи робочого циклу екструдера. Приймемо загальний критерій як адитивну комбінацію окремих критеріїв однакового виду, запишемо його у загальному вигляді так:

$$\begin{aligned} K_{opt} &= (Ch_w + Ch_e + Ch_m) / G_{pr} = K_{opt,heat} + K_{opt,start} + K_{opt,norm\_mode} + K_{opt,compl} = \\ &= \int_0^{t_{heat}} (Ch_{w,heat}(t) + Ch_{e,heat}(t) + Ch_{m,heat}(t)) dt \Big/ \int_0^{t_{heat}} G_{pr,start}(t) dt + \\ &+ \int_{t_{heat}}^{t_{heat}+t_{start}} (Ch_{w,start}(t) + Ch_{e,start}(t) + Ch_{m,start}(t)) dt \Big/ \int_{t_{heat}}^{t_{heat}+t_{start}} G_{pr,start}(t) dt + \\ &+ \int_{t_{heat}+t_{start}}^{t_{heat}+t_{start}+t_{norm}} (Ch_{w,norm}(t) + Ch_{e,norm}(t) + Ch_{m,norm}(t)) dt \Big/ \int_{t_{heat}+t_{start}}^{t_{heat}+t_{start}+t_{norm}} G_{pr,norm}(t) dt + \\ &+ \int_{t_{heat}+t_{start}+t_{norm}}^{t_{heat}+t_{start}+t_{norm}+t_{compl}} (Ch_{w,compl}(t) + Ch_{e,compl}(t) + Ch_{m,compl}(t)) dt \Big/ \int_{t_{heat}+t_{start}+t_{norm}}^{t_{heat}+t_{start}+t_{norm}+t_{compl}} G_{pr,compl}(t) dt, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $t$  — тривалість режиму, індекси *heat*, *start*, *norm*, *compl* — позначають режими пуску, розігріву,

нормального функціонування та завершальний, відповідно.

*Розігрівання екструдера.* Початкове завантаження полімеру має відбуватися у розігріте обладнання. Кожна зона має свій нагрівач, отже, вже на цьому етапі формують температурне поле екструдера.

*Пуск.* Після розігрівання починають завантаження сировини малими дозами, щоб запобігти «заклинюванню» шнека. Продукт, який починає виходити з екструдера — брак, що повертають на переробку. Поступово матеріал заповнює внутрішнє середовище, його розташування в апараті та властивості невідомі. Може статися забивання екструдера, що вимагатиме цілої низки дій для його зупинки, очищення і нового пуску. Пуск вважають закінченим тоді, коли на виході отримують продукт, якість якого відповідає вимогам.

*Нормальне функціонування екструдера.* У цей період в апараті відбувається ущільнення сипких матеріалів; змішування компонентів; інтенсивне деформування матеріалу та зростання тиску, нагрівання матеріалу за рахунок енергії дисипації та зовнішніх джерел, хімічні, фазові та інші перетворення.

*Завершальний режим роботи екструдера* передусь його зупинці або заміні матеріалу.

Зрозуміло, що розрахунок критерію  $K_{opt}$  за (8) виконується за весь цикл роботи  $t_{heat} + t_{start} + t_{norm} + t_{compl}$ , і дає можливість порівнювати ефективність декількох циклів або окремого циклу з плановим показником.

З опису режимів випливають такі уточнення до (8) та припущення:

1) у режимі розігріву відсутні витрати сировини  $\int_0^{t_{heat}} Ch_{m,heat}(t)dt = 0$  та продукції

$\int_0^{t_{heat}} G_{pr,heat}(t)dt = 0$ ; трудовитрати змінюються несуттєво від зміни керувальних змінних, тому не

будемо їх враховувати у критерії оптимізації, тобто  $\int_0^{t_{heat}} Ch_{w,heat}(t)dt = 0$ ;

2) у режимі пуску відсутні втрати продукції  $\int_{t_{heat}}^{t_{heat}+t_{start}} G_{pr,start}(t)dt$ ;

3) у нормальному та завершальному режимах трудовитрати несуттєво залежать від зміни керувальних факторів, тому не будемо їх враховувати у критерії оптимізації, тобто:

$$\int_{t_{heat}+t_{start}}^{t_{heat}+t_{start}+t_{norm}} Ch_{w,norm}(t)dt = 0, \quad \int_{t_{heat}+t_{start}+t_{norm}}^{t_{heat}+t_{start}+t_{norm}+t_{compl}} Ch_{w,compl}(t)dt = 0.$$

Як випливає з (8) та уточнення (1), за критерій управління режимом розігрівання буде використовуватись величина витраченої електричної енергії

$$K_{opt,heat} = \int_{t_{1,heat}}^{t_{2,heat}} (Ch_{e,heat}(t))dt, \quad (9)$$

де  $t_{1,heat}$ ,  $t_{2,heat}$  — початковий та кінцевий час для визначення критерію оптимізації в режимі розігрівання.

Математично задачу оптимізації з урахуванням обмежень на задані температури зон екструдера запишемо так:

$$K_{opt,heat} \rightarrow \min; \quad \Theta_{heat,bot} \leq \Theta_{heat} \leq \Theta_{heat,over}, \quad (10)$$

де  $\Theta_{heat}$ ,  $\Theta_{heat,bot}$ ,  $\Theta_{heat,over}$  — вектори поточних температур у зонах екструдера в режимі розігрівання, вектор допустимих нижніх та верхніх значень температур, відповідно.

Зрозуміло, що інтегральний критерій  $K_{opt,heat}$ , розрахований за (9), може використовуватись для апостеріорного оцінювання ефективності режиму розігрівання, що закінчився. Для оперативного управління процесом задача оптимізації сформульована таким чином: необхідно розігріти екструдер до потрібного температурного режиму по зонах за найкоротший час без перегріву апарату (або з мінімальним перегрівом). У такій постановці задачею системи управління стає забезпечення максимальної швидкого досягнення потрібного температурного режиму.

Далі розглянемо найскладніші перші три етапи.

Для режиму пуску, з урахуванням (8) та зауваження (2), інтегральний критерій запишемо у вигляді

$$K_{opt,start} = \int_{t_{1,start}}^{t_{2,start}} (Ch_{w,start} + Ch_{e,start}(t) + Ch_{m,start}(t)) dt,$$

де  $t_{1,start}$ ,  $t_{2,start}$  — початковий та кінцевий час для визначення критерію оптимізації в режимі пуску.

Задачу оптимізації (7) сформулюємо так:

$$\begin{aligned} K_{opt,start} &\rightarrow \min; \\ \Theta_{start,bot} &\leq \Theta_{start} \leq \Theta_{start,over}; \\ M_{start} &\leq M_{start,over}, \end{aligned} \quad (11)$$

де  $\Theta_{start}$ ,  $\Theta_{start,bot}$ ,  $\Theta_{start,over}$  — вектори поточних температур у зонах екструдера в режимі пуску, вектор допустимих нижніх та верхніх значень температур, відповідно,  $M_{start}$ ,  $M_{start,over}$  — поточний момент на валу шнека в режимі пуску та найбільший допустимий момент для цього режиму. відповідно.

Режим пуску процесу екструзії є стадією повністю непродуктивної роботи екструдера, коли силовинні та енергетичні ресурси, що витрачаються на процес, є чистими витратами. Задача оперативного керування пуском екструдера сформульована так: найшвидше досягти заданого технологічного режиму нормальної експлуатації, забезпечивши при цьому відсутність блокування шнека.

Для режиму нормального функціонування, з урахуванням (8) та зауваження (3), інтегральний критерій запишемо у вигляді

$$K_{opt,norm} = \int_{t_{1,norm}}^{t_{2,norm}} (Ch_{e,norm}(t) + Ch_{m,norm}(t)) dt \Big/ \int_{t_{1,norm}}^{t_{2,norm}} G_{pr,norm}(t) dt, \quad (12)$$

де  $t_{1,norm}$ ,  $t_{2,norm}$  — початковий та кінцевий час для визначення критерію оптимізації в режимі нормального функціонування.

Критерій управління для цього режиму за смыслом збігається із загальною задачею (7), а задачу оптимізації запишемо так:

$$\begin{aligned} K_{opt,norm} &\rightarrow \min; \\ \Theta_{norm,bot} &\leq \Theta_{norm} \leq \Theta_{norm,over}; \\ N_{norm,bot} &\leq N_{norm} \leq N_{norm,over}; \\ P_{norm,bot} &\leq P_{norm} \leq P_{norm,over}; \\ \Omega_{qual,bot} &\leq \Omega_{qual} \leq \Omega_{qual,over}, \end{aligned} \quad (13)$$

де  $\Theta_{norm}$ ,  $\Theta_{norm,bot}$ ,  $\Theta_{norm,over}$  — вектори поточних температур в зонах екструдера в нормальному режимі, вектор допустимих нижніх та верхніх значень температур, відповідно,  $N_{norm}$ ,  $N_{norm,over}$  — поточна та найбільша допустима кількість обертів шнека в нормальному режимі;  $P_{norm}$ ,  $P_{norm,bot}$ ,  $P_{norm,over}$  — поточний, допустимі найменший та найбільший тиск в головці екструдера в нормальному режимі, відповідно,  $\Omega_{qual}$ ,  $\Omega_{qual,bot}$ ,  $\Omega_{qual,over}$  — вектори поточних, допустимих нижніх та верхніх значень показників якості продукції, відповідно.

## Висновки

В роботі використано системний підхід до розробки алгоритму оптимального управління процесами хіміко-технологічної системи з виготовлення полімерної продукції. Сформульовано задачі та критерії управління як виробничим циклом роботи екструдера у цілому, так і окремими його етапами. При цьому збережено їх взаємозв'язок.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ярошук Л. Д. Системний аналіз процесу екструзії для визначення задач та структури системи управління [текст] / Л. Д. Ярошук, О. А. Жученко // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2013. — № 2/3 (62). — С. 31—35.
2. Ким В. С. Теория и практика экструзии полимеров [текст] / В. С. Ким. — М. : КОЛОСС, 2005. — 568 с.

3. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления и приложения. — М. : Радио и связь, 1992. — С. 504.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 14.11.2014

**Ярошук Людмила Дем'янівна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації хімічних виробництв, e-mail: vicleon@i.ua;

**Жученко Олексій Анатолійович** — канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації хімічних виробництв, e-mail: azhuch@ukr.net.

Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут», Київ

**L. D. Yaroshchuk<sup>1</sup>**  
**O. A. Zhuchenko<sup>1</sup>**

## Formation of control criteria system of multistage extrusion process

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

*The production process of manufacturing polymer products in worm extrusion is researched to create the optimal control system. An integral criterion for optimality of the process that determines the power consumption per unit of raw material and finished products is suggested in the paper. The general criterion is divided into integrated criteria for each stage based on their features. The transition from integrated criteria to those that are formulated in the values of process variables that can be quickly measured is completed.*

**Keywords:** criteria control, extrusion, performance, optimal control.

**Yaroshchuk Liudmyla D.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Chemical Automation Manufactures, e-mail: vicleon@i.ua;

**Zhuchenko Oleksii A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Chemical Automation Manufactures, e-mail: azhuch@ukr.net

**Л. Д. Ярошук<sup>1</sup>**  
**А. А. Жученко<sup>1</sup>**

## Формирование системы критериев управления многостадийным процессом экструзии

<sup>1</sup>НТУ «Київський політехнічний інститут»

*Исследован производственный процесс изготовления полимерных изделий в червячном экструдере с целью создания системы оптимальной управления. Предложен интегральный критерий оптимальности для этого процесса, который определяет расход электроэнергии и сырья на единицу готовой продукции. Общий критерий разложен на интегральные критерии для каждого этапа с учетом их особенностей. Выполнен переход от интегральных критериев к таким, что формулируются в значениях технологических переменных, которые можно оперативно измерять.*

**Ключевые слова:** критерий управления, экструзия, производительность, оптимальное управление.

**Ярошук Людмила Демьяновна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации химических производств, e-mail: vicleon@i.ua;

**Жученко Алексей Анатольевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации химических производств, e-mail: azhuch@ukr.net