

Сравнительная оценка соответствия действующих методик разработанной проводилась на балках и ригелях, выпускаемых ОАО «Завод сборного железобетона № 1». Средняя арифметическая погрешность результатов расчетов по обоим методам составила 3,84 %. При этом для всех вариантов расчета существующая разница не повлияла на значение предела огнестойкости. Проведенные огневые испытания железобетонных балок по методике ГОСТ 30247.1 на полигоне НИИ ПБ и ЧС показали, что указанный метод позволяет получить приемлемый результат с погрешностью, не превышающей 16 %. Полученные расчетные результаты для всех испытанных балок были ниже экспериментальных данных.

ВЫВОД

Разработанная методика позволяет повысить объективность расчетов пределов огнестойкости изгибаемых железобетонных кон-

рукций и рекомендуется для обоснования экспертных оценок в области пожарной безопасности органами Государственного пожарного надзора.

ЛИТЕРАТУРА

1. МДС 21.2–2000. Методические рекомендации по расчету огнестойкости и огнестойкости железобетонных конструкций / ГУП «НИИЖБ». – М.: Стройиздат, 2000. – 92 с.
2. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. – М.: Пожарная безопасность и наука, 2001. – 382 с.
3. Яковлев А. И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.
4. Милованов А. Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
5. Рекомендации по расчету пределов огнестойкости бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1986. – 40 с.
6. Инструкция по расчету фактических пределов огнестойкости железобетонных строительных конструкций на основе применения ЭВМ. – М.: ВНИИПО, 1975. – 218 с.

УДК 004.021:004.942

РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ В ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ ПЕРЕЭТЕРИФИКАЦИИ

Канд. техн. наук, доц. ДОРОГОВ Н. Н.

Могилевский государственный университет продовольствия

Реактор переэтерификации является первым в двухреакторной группе получения полимера периодическим способом. Он представляет собой цилиндрический аппарат, обогреваемый подачей пара в рубашку. В силу больших затрат тепловой энергии на проведение процесса предварительно были рассчитаны оптимальные программы, минимизирующие среднюю температуру нагрева жидкой реагирующей массы.

Из-за значительного рабочего объема реактор как объект управления обладает существенной инерцией и запаздыванием (единицы минут). В связи с непрерывным удалением метанола объем реакционной массы уменьшается

на 30...35 %, поэтому необходимо учитывать изменение характеристик реактора: коэффициента передачи, постоянной времени, запаздывания. На объект воздействуют возмущения, связанные с изменениями как давления обогревающего пара, так и количества удаляемого метанола, уносящего с собой часть массы и теплоты. Последнее приводит к уменьшению рабочего объема и температуры реакционной массы. Эти возмущения система управления должна компенсировать в связи с жесткими требованиями к точности поддержания оптимальных температурных профилей [1].

Возмущения по пару действуют в рубашке реактора, которую можно считать малоинерци-

онным объектом. Их можно скомпенсировать, например быстродействующим П-регулятором. Возмущения второго типа ведут к изменению рабочих характеристик основного объекта, а также температуры реакционной массы. Это приводит к необходимости периодически определять параметры и подставлять новые значения в уравнение объекта. Компенсацию же температурных изменений следует проводить с помощью корректирующего регулятора, воздействующего на изменение задания П-регулятору.

Из-за влияния запаздывания на устойчивость САР для улучшения характеристик основного контура системы желательно использовать прогнозатор Смита (ПС) [2]. С учетом сказанного выше можно представить структурную схему САР в виде, показанном на рис. 1. Поясним условные обозначения на структурной схеме.

Передаточные функции: $W_{об1}$ – рубашки реактора (малоинерционный объект); $W_{об}$ – то же реактора (основной объект); $W_{об2}$ – то же объекта, связывающего изменение количества удаляемого метанола с изменением температуры реактора; $W_{рег}$ – то же быстродействующего П-регулятора; $W_{рег}^k$ – то же корректирующего регулятора; $W_{ПС} = W_{обМ}(1 - e^{-pt})$ – то же прогнозатора Смита; $W_{обМ}$ – то же модели объекта (может не совпадать с $W_{об}$).

Сигналы: $\Delta P_{руб}$ – возмущение по пару; $T_{руб}$ – температура обогревающего пара (управляющее воздействие на основной объект); $T_{руб1}$ – задание, вырабатываемое корректирующим регулятором; $T_{зад}$ – заданное значение тем-

пературы в реакторе (оптимальный температурный профиль); z_1 – управляющее воздействие на рубашку реактора; z_2 – изменение температуры, связанное с действием возмущений по удаляемому метанолу; ϵ , ϵ_1 , ϵ_2 – разностные сигналы на входах регуляторов; $\Delta Q_{исп}$ – возмущающее воздействие (изменение количества испаряемого метанола); τ – запаздывание в основном объекте.

При расчете вспомогательного контура примем, что рубашка реактора является безынерционным объектом. В связи с этим быстродействующий регулятор $W_{рег}$ практически точно поддерживает равенство $T_{руб} = T_{руб1}$, компенсируя возможные возмущения $\Delta P_{руб}$. Выбор значения $W_{рег} = K_{рег}$ определяется, как обычно, допустимым значением статической ошибки. Считая передаточную функцию рубашки реактора $W_{об1} = K_{об1} / (T_{об1}p + 1)$, где $K_{об1}$, $T_{об1}$ – коэффициент передачи и постоянная времени, получим изображение температуры $T_{руб}$ в виде

$$T_{руб}(p) = [K_{рег}K_{об1} / (T_{об1}p + 1 + K_{рег}K_{об1})] T_{руб.зад} + [K_{об1} / (T_{об1}p + 1 + K_{рег}K_{об1})] \Delta P_{руб}(p). \quad (1)$$

Единственный настроечный параметр $K_{рег}$ необходимо выбрать таким, чтобы значения $K_{рег}K_{об1}$ и $1 + K_{рег}K_{об1}$ отличались на заданную величину. Например, точность 0,1 % при изменении $T_{руб.зад}$ будет гарантирована при $K_{рег}K_{об1} : (1 + K_{рег}K_{об1}) = 0,999$, т. е. $K_{рег} = 100 \text{ бар} / \text{°C}$, если $K_{об1} = 10 \text{ °C/бар}$. Ошибка по возмущению для $\Delta P_{руб} = 1 \text{ бар}$ будет определяться оригиналом

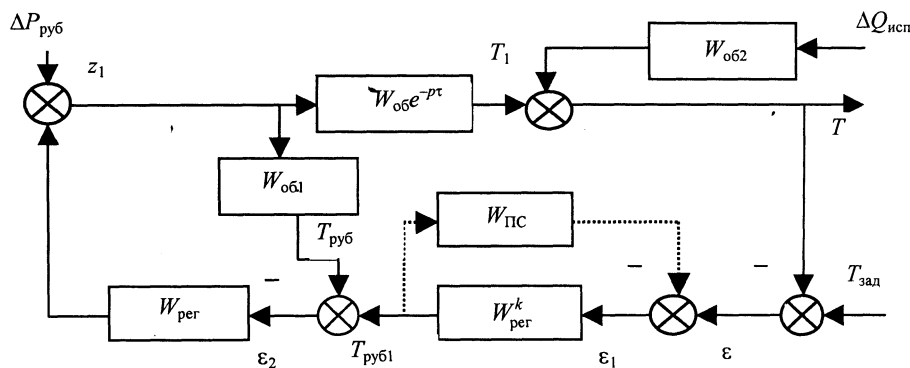


Рис. 1

$$T_{\text{руб}}(t) = [K_{\text{об1}}/(1 + K_{\text{пер}}K_{\text{об1}})] [(1 - \exp(-(1 + K_{\text{пер}}K_{\text{об1}})/T_{\text{об1}})t), \quad (2)$$

т. е. при $t \rightarrow \infty$ $T_{\text{руб}}(t) \rightarrow K_{\text{об1}}/(1 + K_{\text{пер}}K_{\text{об1}}) \cong \cong 0,01$ °С (для $K_{\text{об1}} = 10$ °С/бар). Без ПС управляющий сигнал $T_{\text{руб}}(p) = W_{\text{пер}}^k(p)\varepsilon(p)$, а с ПС

$$T_{\text{руб}}(p) = W_{\text{пер}}^k(p)[\varepsilon(p) + W_{\text{обМ}}e^{-p\tau}T_{\text{руб}}(p) - W_{\text{обМ}}T_{\text{руб}}(p)]. \quad (3)$$

Первое слагаемое – обычный выходной сигнал регулятора, вычисляемый на основе ошибки управления, второе – поправочный множитель, относящийся к предыдущему управляющему сигналу $T_{\text{руб}}(t - \tau)$, умноженный на передаточную функцию модели объекта $W_{\text{обМ}}$, а последнее учитывает текущий управляющий сигнал.

Рассматривая контур корректирующего регулятора, можно получить выражение для изображения температуры T реакционной смеси в реакторе

$$T(p) = [W_{\text{пер}}^k W_{\text{об}}e^{-p\tau}/(1 + W_{\text{пер}}^k W_{\text{обМ}})]T_{\text{зад}}(p) + W_{\text{об2}}[1 - W_{\text{пер}}^k W_{\text{об}}e^{-p\tau}/(1 + W_{\text{пер}}^k W_{\text{обМ}})]\Delta Q_{\text{исп}}(p). \quad (4)$$

Оно справедливо, если модель точно описывает объект, т. е. $W_{\text{обМ}} = W_{\text{об}}$. Из него видно, что запаздывание исключено из характеристического уравнения. Это позволяет выбирать достаточно большие значения коэффициента усиления регулятора без потери устойчивости.

Задаваясь передаточными функциями объекта и регулятора в виде $W_{\text{об}} = K_{\text{об}}e^{-p\tau}/(T_{\text{об}}p + 1)$, $W_{\text{пер}}^k = K_p + 1/T_{\text{из}}p$, где $K_{\text{об}}$ – коэффициент передачи объекта; K_p – коэффициент усиления регулятора; $T_{\text{из}}$ – время изодрома, найдем реакцию объекта на изменение уставки

$$T(p) = [K_{\text{об}}K_p e^{-p\tau}(p + 1/K_p T_{\text{из}})/(T_{\text{об}}p^2 + (1 + K_{\text{об}}K_p)p + K_{\text{об}}/T_{\text{из}})]T_{\text{зад}}(p) \quad (5)$$

и возмущение $\Delta Q_{\text{исп}}(p) = 1/p$ (при $W_{\text{об2}} = k_2$)

$$pT(p) = k_2[1 - K_{\text{об}}K_p e^{-p\tau}(p + 1/K_p T_{\text{из}})/(T_{\text{об}}p^2 + (1 + K_{\text{об}}K_p)p + K_{\text{об}}/T_{\text{из}})]. \quad (6)$$

Отметим следующее: объект описывается линейным ОДУ с запаздыванием, в качестве регулятора взят ПИ-регулятор, имеющий два настроечных параметра K_p и $T_{\text{из}}$.

График оптимального температурного профиля [1] имеет вид $T_{\text{зад}}(t) = T_0(t) + \sum a_i(t - t_i) + T_N(t)$, где $T_0(t) = \text{const}$; $T_N(t) = \text{const}$; a_i – тангенс угла наклона температурного профиля на участке $t_{i+1} \geq t \geq t_i$, т. е. $a_i = (T_{i+1} - T_i)(t - t_i)/(t_{i+1} - t_i)$. Для того чтобы уменьшить влияние запаздывания в объекте, надо несколько изменить задающее воздействие, учитывая, что запаздывание не одинаково на разных участках. Например, на участке перехода от постоянной температуры $T_0(t) = \text{const}$ к линейно изменяющейся следует в момент $t_1 - \tau_1$ уже начинать изменение задания с наклоном a_1 , в момент $t_2 - \tau_2$ – с наклоном a_2 и так далее. Так как кроме запаздывания будут также изменяться параметры регулятора, потребуется на каждом участке определять их оптимальным образом. Затем в соответствии с составленной таблицей оптимальных параметров подставлять их значения для вычисления реального температурного графика.

Исследуем качество регулирования на участке постоянной температуры. Оригинал функции (5) при $T_{\text{зад}}(p) = 1/p$

$$T(t) = 1 + (1/T_{\text{из}} - \alpha)e^{-\alpha t}/(\alpha^2 - c) + (1/T_{\text{из}} - \beta)e^{-\beta t}/(\beta^2 - c), \quad (7)$$

где $-\alpha, -\beta$ – корни уравнения $T_{\text{об}}p^2 + (1 + K_{\text{об}}K_p) \times \times p + K_{\text{об}}/T_{\text{из}} = 0$; $c = K_{\text{об}}/T_{\text{из}}$, запаздывание $\tau = 0$.

Критерий качества вычислим численно, задав его в виде

$$S = \int_0^{ik} |1 - T(t)| dt \rightarrow \min_{K_p, T_{\text{из}}}$$

и минимизируя по параметрам $K_p, T_{\text{из}}$. Как показывают расчеты, критерий S монотонно уменьшается при неограниченном возрастании коэффициента усиления регулятора K_p и имеет минимум по параметру $T_{\text{из}}$. На рис. 2 показана реакция системы управления, рассчитанная по формуле (7) с учетом запаздывания для случая, когда $T_{\text{зад}}$ испытывает единичный скачок. Перечень параметров САУ для этого случая: $K_{\text{об}} = 1$ °С/°С; $K_p = 100$ °С/°С, $T_{\text{об}} = 5$ мин; $T_{\text{из}} = 3$ с;

$\tau = 1$ мин, $tk = 14$ мин. При вычислении реакции САР на возмущение $\Delta Q_{исп}(p) = 1/p$ (при $W_{об2} = k_2 = -0,8$ °С/моль) по оригиналу выражения (6) видно, что по истечении времени запаздывания система быстро приходит в установившееся состояние. Это является следствием введения прогнозатора Смита и точной модели объекта.

На участке линейно изменяющейся температуры изображение $T_{зад}(p) = a_i/p^2$, где примерная величина наклона $a_i = 1$ °С/мин. При этом оригинал выражения (5) будет иметь вид без учета запаздывания

$$T(t) = t - T_{из}/K_{об} - (1/T_{из} - \alpha)e^{-\alpha t}/(\alpha^3 - \alpha^2\beta) - (1/T_{из} - \beta)e^{-\beta t}/(\beta^3 - \beta^2\alpha). \quad (8)$$

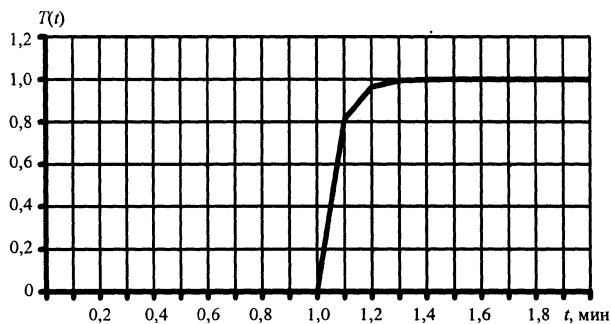


Рис. 2

Выбор оптимальных значений параметров регулятора произведем минимизацией функционала

$$S = \int_0^{tk} |t - T(t)| dt \rightarrow \min_{K_p, T_{из}}$$

Вычисления приводят к выводу о том, что критерий монотонно падает с ростом K_p и имеет минимум по $T_{из}$.

С учетом слагаемого $T_{из}/K_{об}$, которое вносит постоянную ошибку в значение $T(t)$, следует изменить $T_{зад}(t)$, добавив на каждом шаге величину этого слагаемого. В результате модифицированная функция $T_{зад}(t)$ на линейном участке, показанная на рис. 3, хотя и приобретает

более сложный вид по сравнению с исходным оптимальным профилем, приводит к более точной его реализации.

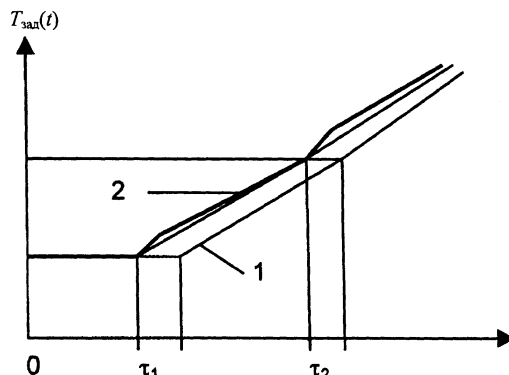


Рис. 3

Расчет значений S показывает, что среднее отклонение температурных профилей от заданных составляет на линейных участках не более 0,1 °С. Это говорит о малости ошибок в значениях эффектов оптимизации при отклонении реальных профилей от оптимальных.

В заключение следует отметить необходимость проведения предварительных экспериментальных исследований реактора для синтеза оптимального алгоритма управления им. В частности, на каждом временном участке температурного профиля требуется определить параметры рубашки реактора как вспомогательного объекта $K_{об1i}, T_{об1i}, i = 1, \dots, 14$, а также параметры основного объекта $K_{обi}, T_{обi}, \tau_i, i = 1, \dots, 14$ и объекта, связанного с возмущениями по испаряемому метанолу, методами активного эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорогов Н. Н. Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов в производстве полимера полиэтилентерефталата. – Мн.: Изд. центр БГУ, 2002. – 120 с.
2. Рей У. Методы управления технологическими процессами / Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 368 с.