

СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ БРАГОРЕКТИФИКАЦИИ

Article is devoted to synthesis of an adaptive control system by non-stationary objects with delay. Synthesis of a daptive systems of a utomatic control by qu ality of a pr oduct and economy of power resources and productivity with the help of the second method of Lyapunov is carried out. The object of management has essential transport delay and variable factor of transfer. For management of similar objects of t he m ost e ffective a re, the s ystems c ontaining l inear predictor S mith and p roviding reorganization of the managing device at changes of factor of transfer of object. The received algorithm of adaptation is physically sold. The example of application of the given algorithm for object of the management described by the equation of 2-nd order is resulted.

Введение. В настоящее время является актуальным создание систем управления технологическими объектами, оптимально используемыми на каждом режиме своего функционирования все имеющиеся ресурсы (энергетические, информационные, вычислительные и др.) для достижения главной для данного режима цели при наличии множества ограничений. В полной мере это относится и к системам управления для процесса брагоректификации, для которого подлинная оптимизация во зможна то лько в процессе функционирования, так как учитывает текущее состояние и возникшие изменения.

Брагоректификационная установка (БРУ) является сложным нелинейным, нестационарным, многомерным и многосвязным объектом управления. Поэтому для эффективного управления БРУ необходимо применять нелинейное многосвязное управление. Без этого невозможно обеспечить максимально предельные значения эксплуатационных параметров (время переходных процессов, удельный расход теплоносителя, хладагента и т. д.) и максимально задействовать функционирование всей БРУ в целом.

Важно, что технологический поток между колоннами БРУ находится в жидком состоянии и, следовательно, между колоннами нет связи по паровому потоку. Это существенно ослабляет влияние последующих колонн на режим предыдущей колонны. Благодаря указанным обстоятельствам каждую колонну (со своим дефлегматором и конденсатором) можно рассматривать как отдельный объект управления (ОУ), что в значительной мере упрощает анализ и синтез системы регулирования.

Особенностью ОУ в технологическом процессе брагоректификации является наличие транспортного запаздывания. Присутствие в ОУ запаздывания осложняет решение задачи стабилизации управляемых параметров и снижает качественные показатели автоматических систем регулирования. В целях построения высокоточных систем управления необходимо учесть эффект транспортного запаздывания объекта на этапе проектирования.

Существует много методов управления нестационарным объектом с транспортным запаздыванием. Среди множества методов управления широкое применение получили метод Смита и методы оптимального управления.

Суть метода Смита состоит в том, что, кроме главной обратной связи, в системе управления дополнительно используется одна отрицательная и одна положительная связи, охватывающие регулятор. Особенностью дополнительных связей является то, что в цепь отрицательной связи включена модель объекта без запаздывания, а в цепь положительной обратной связи – модель объекта с запаздыванием. Использование сигнала на выходе модели объекта без запаздывания позволяет регулятору прогнозировать будущее поведение системы. Эти системы получили название систем с упредителем Смита [1].

Различные подходы развиты для решения задач синтеза адаптивных систем управления нестационарными объектами с запаздыванием. Используемые методы могут быть основаны на минимизации критерия качества, на теории гиперустойчивости или теории устойчивости Ляпунова.

Основная часть. Анализ известных методов синтеза системы автоматического управления (САУ) с позиции применения для управления качеством продукта и экономии энергоресурсов на стадии ректификации в производстве ректифицированного этилового спирта позволяет сделать вывод о том, что каждый из них дает удовлетворительные результаты лишь в случае совокупности свойств, присущих стадии ректификации, а это значит, что они разработаны недостаточно.

Для идентификации ОУ в рамках АСУТП на стадии ректификации в процессе производства этилового спирта на базе персонального компьютера использовался один из вариантов компенсационного метода. В этом случае математического описания сигнала не требуется. Быстродействие компенсационного метода зависит в основном от начального состояния модели и скорости сходимости алгоритма оптимизации функционала качества. Точность этого метода состоит в том, что входное воздействие $U(t)$ подается на вход идентифицируемого ОУ и его модель (МО) (рис. 1).

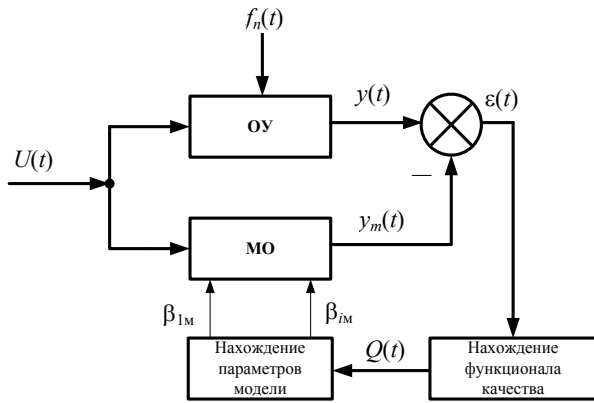


Рис. 1. Схема системы, реализующий компенсационный метод

Структура МО с настраиваемыми параметрами β_{im} подобна структуре реального ОУ, на который действует неконтролируемое возмущение $f_n(t)$. Выходной сигнал объекта $y(t)$ сравнивается с сигналом выхода модели $y_m(t)$, и в соответствии с выбранным функционалом качества, зависящим от ошибки $\varepsilon(t) = y(t) - y_m(t)$, осуществляется настройка параметров модели. В этом методе недостаточность информации об объекте компенсируется в результате настройки параметров модели. Для оценки степени соответствия модели реальному объекту используется, например, функционал вида

$$(1)$$

где T – интервал квазистатики объекта.

Чем меньше величина $Q(t)$, тем точнее с точки зрения этого критерия модель отражает реальный процесс. Решение задачи уточнения модели объекта при неудовлетворительных оценках неизбежно приводит к нахождению параметров β_{im} из условия минимума выбранного функционала. Для этого применяются, как правило, поисковые методы. Алгоритм нахождения оптимального значения вектора β , соответствующего минимуму $Q(\beta)$, задается формулой

$$(2)$$

где k – номер шага; $R(k)$ – матрица.

Элементы матрицы $R(k)$ зависят от числа шагов k и вектора β ($k - 1$). Если выполняются условия сходимости итеративного процесса, то вектор β стремится к β^0 , соответствующему точке минимума функционала $Q(\beta)$ при

Рассматриваемый объект управления качеством продукта и экономии энергоресурсов на стадии ректификации в производстве ректифицированного этилового спирта по каналу управления «расход греющего пара – концентрация этилового спирта в полупродуктах (готового продукта)»

можно отнести к виду объектов с одним входом и транспортным запаздыванием в управлении.

Для бражной колонны (БК) БРУ в качестве канала управления выбираем канал «расход греющего пара – концентрация этилового спирта в бражном дистилляте». Для эпорационной колонны (ЭК) БРУ в качестве канала управления принимаем канал «расход греющего пара – концентрация этилового спирта в эпорате». Для ректификационной колонны (РК) БРУ в качестве канала управления выбираем канал «расход греющего пара – концентрация этилового спирта в ректификате» [2].

Проведем синтез адаптивной системы автоматического управления (АСАУ) качеством продукта и экономией энергоресурсов с помощью метода функционала Ляпунова – Красовского. Объект управления имеет существенное транспортное запаздывание и переменный коэффициент передачи. Для управления подобными объектами наиболее эффективными являются системы, содержащие линейный упредитель Смита и обеспечивающие перестройку управляющего устройства при изменениях коэффициента передачи объекта.

Пусть динамика участка канала управления, включающего ОУ и усилитель с перестраиваемым коэффициентом передачи $K_c(t)$, описывается следующим уравнением:

$$(3)$$

где $y(t)$ – выходная координата объекта; a_i – постоянные коэффициенты; $K(t)$ – переменный коэффициент передачи объекта; $U(t - \tau)$ – управляющее воздействие.

В этом случае модель ОУ, используя в упредителе Смита, описывается формулой

$$(4)$$

где $y_m(t)$ – выходная координата модели; a_i, K_m – постоянные коэффициенты модели.

Изменение $K(t)$ ОУ должно компенсироваться изменением переменного коэффициента $K_c(t)$. Ставится задача синтеза алгоритма самонастройки коэффициента $K_c(t)$, обеспечивающего устойчивость движения объекта относительно движения модели. При этом предполагается, что справедлива гипотеза квазистационарности.

Синтез АСАУ выполним следующим образом. Обозначим ошибку рассогласования между выходными координатами модели и объекта через $\varepsilon(t)$:

$$(5)$$

Вычитая (4) из (3), получим уравнение относительно координатного рассогласования $\varepsilon(t)$:

$$\varepsilon^{(n)}(t) + \sum_{i=0}^{n-1} a_i \varepsilon^{(i)}(t) = \gamma U(t - \tau), \quad (6)$$

где $\gamma = K_m - K_c(t)K(t)$.

Если система, описываемая уравнением (6), наблюдаема, то ее можно привести к нормальному виду, введя следующие обозначения:

$$x_1 = \varepsilon(t); \quad x_{i+1} = \dot{x}_i(t), \quad i=1, 2, \dots, n-1;$$

$$\dot{x}_n = -\sum_{i=0}^{n-1} a_i x_i + \gamma U(t-\tau).$$

С учетом введенных обозначений представим выражение (6) в виде

$$\dot{X}(t) = AX(t) + U(t-\tau), \quad (7)$$

где $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$;

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix};$$

$$U(t-\tau) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ \gamma U(t-\tau) \end{bmatrix}.$$

Алгоритм адаптации определим из условия устойчивости движения объекта относительно движения модели. Для решения задачи применим метод Ляпунова – Красовского. Для системы (7) построим функционал в виде

$$V = KX^T PX + \lambda_1 \gamma^2 + \lambda_2 \int_{t-\tau}^t U^2(\sigma) d\sigma, \quad (8)$$

где P – постоянная положительно определенная симметричная матрица размерности $n \times n$; λ_1, λ_2 – положительные числа.

Из уравнения (8) видно, что V является положительно определенным и удовлетворяет всем требованиям теоремы Н. Н. Красовского. Полная производная по времени от V на решениях системы (7) имеет вид

$$\dot{V} = K \dot{X}^T PX + KX^T P \dot{X} + 2\lambda_1 \gamma \dot{\gamma} + \lambda_2 \times$$

$$\times \left(\int_{t-\tau}^t U^2(\sigma) d\sigma \right). \quad (9)$$

Выполнив промежуточные преобразования слагаемых уравнения (9), можно записать:

$$\dot{V} = KX^T (A^T P + PA)X +$$

$$+ 2K\gamma U(t-\tau) \sum_{i=1}^n x_i P_{ii} + 2\lambda_1 \gamma \dot{\gamma} +$$

$$+ \lambda_2 U^2(t) - \lambda_2 U^2(t-\tau). \quad (10)$$

Если матрица A является гурвицевой, то имеет место следующее равенство:

$$A^T P + PA = -Q, \quad (11)$$

где Q – положительно определенная матрица. С учетом (11) выражение (10) примет вид

$$\dot{V} = -KX^T QX + 2K\gamma \times$$

$$\times U(t-\tau) \sum_{i=1}^n x_i P_{ii} + 2\lambda_1 \gamma \dot{\gamma} +$$

$$+ \lambda_2 U^2(t) - \lambda_2 U^2(t-\tau). \quad (12)$$

Устойчивость процесса перестройки $K_c(t)$ будет обеспечена, если производная $\dot{V} \leq 0$. Она будет отрицательно определенной всюду, если, как видно из (12), соблюдаются следующие условия:

$$-KX^T QX + \lambda_2 U^2(t) - \lambda_2 U^2(t-\tau) \leq 0. \quad (14)$$

Для выполнения условия (13) достаточно, чтобы было справедливо равенство

$$\dot{\gamma} = -\frac{K}{\lambda_1} U(t-\tau) \sum_{i=1}^n x_i P_{ii}. \quad (15)$$

На практике функция управления $U(t)$ ограничена, поэтому всегда можно выбрать такой коэффициент $\lambda_2 \geq 0$, что условие (14) выполняется.

Рассмотрим неравенство (14). Для квадратичной формы справедливо следующее соотношение:

$$\eta_1 \|X(t)\|^2 \leq X^T(t) QX(t) \leq \eta_2 \|X(t)\|^2, \quad (16)$$

где

$$\eta_1 = \min_i r_i(Q), \quad i=1, 2, \dots, n; \quad (17)$$

$$\eta_2 = \max_i r_i(Q), \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (18)$$

В (17) и (18) через $r_i(Q)$ обозначены вещественные собственные числа матрицы Q , которые являются положительными числами в силу положительной определенности матрицы Q .

Аналогично можно показать:

$$\lambda_2 \eta_5 \|X(t)\|^2 \leq \lambda_2 U^2(t-\tau) \leq \lambda_2 \eta_6 \|X(t)\|^2, \quad (19)$$

$$\lambda_2 \eta_5 \|X(t)\|^2 \leq \lambda_2 U^2(t-\tau) \leq \lambda_2 \eta_6 \|X(t)\|^2, \quad (20)$$

где

$$\eta_3 = \min_t U^2(t) \min_j r_j(P); \quad (21)$$

$$\eta_4 = \max_t U^2(t) \max_j r_j(P); \quad (22)$$

$$\eta_5 = \min_t U^2(t-\tau) \min_j r_j(P); \quad (23)$$

$$\eta_6 = \max_t U^2(t - \tau) \max_j r_j(P). \quad (24)$$

Поскольку

$$\min_t U^2(t) = \min_t U^2(t - \tau), \quad (25)$$

$$\max_t U^2(t) = \max_t U^2(t - \tau), \quad (26)$$

то можно записать:

$$\eta_3 = \eta_5, \quad \eta_4 = \eta_6. \quad (27)$$

Тогда для выражения (14) достаточно, чтобы:

$$-\eta_1 \|X(t)\|^2 + \lambda_2 \eta_4 \|X(t)\|^2 - \lambda_2 \eta_3 \|X(t)\|^2 \leq 0, \quad (28)$$

$$\eta_1 + \lambda_2 \eta_3 = \lambda_2 \eta_4. \quad (29)$$

Таким образом, λ_2 выбирается так, чтобы оно удовлетворяло соотношению

$$(30)$$

Предполагается, что на интервале рассмотрения ОУ справедлива гипотеза квазистационарности его коэффициента усиления:

$$\dot{K}(t) \approx 0. \quad (31)$$

Из уравнения (15) и с учетом условия (31) получим алгоритм перестройки $K_c(t)$:

$$(32)$$

Полученный алгоритм (32) физически реализуем. На рис. 2 представлена структурная схема АСАУ с упредителем Смита, реализующая алгоритм (32).

Характерной особенностью БРУ косвенного действия является то, что они представляют собой последовательное соединение нескольких колонн (бражной, эпорационной и ректификационной). И хотя каждую колонну можно рассматривать как отдельный ОУ, обладающий детектирующими свойствами, в ряде случаев необходимо учитывать статические и динамические характеристики цепочки колонн. Это необходимо при разработке систем автоматизации, предусматривающих автоматическое согласование режимов отдельных колонн, а также при синтезе АСАУ установкой в целом [3].

Связь между колоннами БРУ осуществляется по продуктовым потокам. Уровень эпората в нижней части эпорационной колонны является естественным индикатором материального равновесия потоков в установке. Поэтому при разработке системы автоматизации, обеспечивающей автоматическое согласование режимов колонн БРУ, следует располагать статической и динамической характеристиками по каналу «расход бражки – уровень эпората» [3].

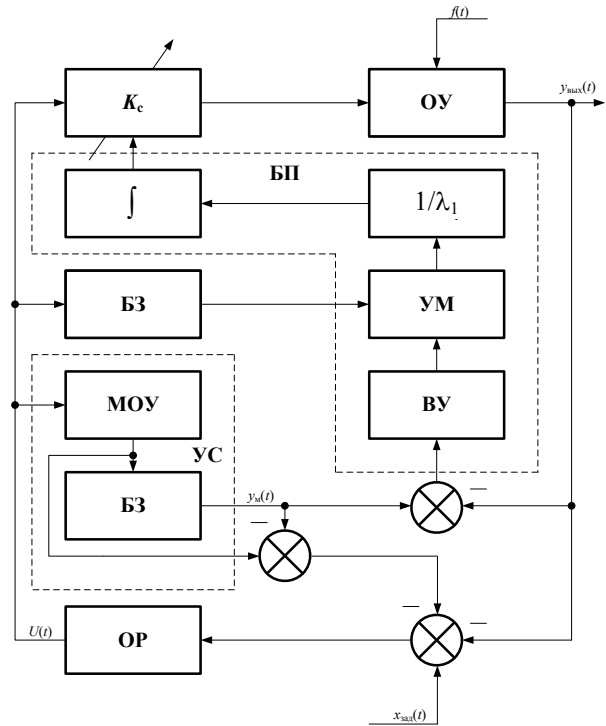


Рис. 2. Структурная схема АСАУ, синтезированная методом функционала Ляпунова – Красовского: ОР – основной регулятор; БЗ – блок задержки; МОУ – модель ОУ без запаздывания; ∫ – интегратор; K_c – усилитель с перестраиваемым коэффициентом усиления; ОУ – ОУ с временным запаздыванием τ ; $1/\lambda_1$ – усилитель с коэффициентом усиления; УМ – умножитель сигналов; ВУ – вычислительное устройство, вычисляющее сумму; БП – блок подстройки; УС – упредитель Смита; $x_{зад}(t)$ – вход ОУ; $y_{вых}(t)$ – выход ОУ; $y_m(t)$ – выход модели ОУ; $U(t)$ – управляющий сигнал

Проведем синтез АСАУ производительности БРУ с помощью метода функционала Ляпунова – Красовского. Объект управления имеет существенное транспортное запаздывание и переменный коэффициент передачи. Для управления подобными объектами наиболее эффективными являются системы, содержащие линейный упредитель Смита и обеспечивающие перестройку управляющего устройства при изменениях коэффициента передачи объекта.

Алгоритм адаптации аналогичен предыдущему. Структурная схема АСАУ, содержащая линейный упредитель Смита и обеспечивающая перестройку коэффициента усиления модели ОУ, согласно определенному алгоритму адаптации, представлена на рис. 3.

Структурная схема АСАУ производительности, представленная на рис. 3, позволяет повысить точность управления продуктовыми потоками всей БРУ косвенного действия в целом.

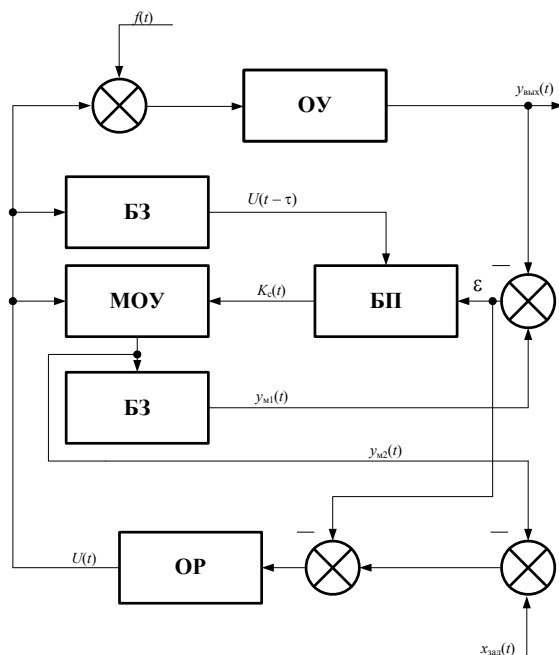


Рис. 3. Структурная схема АСАУ, синтезированная методом функционала Ляпунова – Красовского: ОР – основной регулятор; БЗ – блок задержки; МОУ – модель ОУ без запаздывания; БП – блок подстройки; ОУ – ОУ с временным запаздыванием τ ; $K_c(t)$ – перестраиваемый коэффициент усиления; $x_{зад}(t)$ – вход ОУ; $y_{вых}(t)$ – выход ОУ; $y_{м1}(t)$ – выход модели ОУ с временным запаздыванием; $y_{м2}(t)$ – выход модели ОУ без запаздывания; ε – величина рассогласования; $U(t)$ – управляющий сигнал; $U(t - \tau)$ – управляющий сигнал, предшествующий на время τ

Заключение. Приведем пример применения данного алгоритма для ОУ, описываемого уравнением 2-го порядка:

$$= K_c K(t) U(t - \tau), \quad (33)$$

где T_1, T_2 – постоянные времени объекта фиксированы и известны; K_c – перестраиваемый коэффициент; $K(t)$ – коэффициент объекта неизвестен, причем предполагается, что в течение переходного процесса производная $K(t) \approx 0$.

Модель в линейном упредителе Смита описывается уравнением

$$= K_m(t) U(t - \tau). \quad (34)$$

Уравнение относительно ошибки рассогласования $y(t)$ и $y_m(t)$ имеет вид

$$(35)$$

$$\text{где } a_0 = \frac{1}{T_1 T_2}; \quad a_1 = \frac{T_1 + T_2}{T_1 T_2}.$$

Введя следующие обозначения:

$$X_1 = \varepsilon; \quad X_2 = \dot{X}_1; \\ \dot{X}_2 = -a_1 \dot{\varepsilon} - a_0 \varepsilon + a_0 \gamma U(t - \tau),$$

представим уравнение (35) в виде

$$\dot{X}(t) = AX(t) + U(t - \tau). \quad (36)$$

Функционал Ляпунова – Красовского выберем в виде формулы (9).

Условие (13) примет следующий вид:

$$2\gamma a_0 K(t) U(t - \tau) \sum_{i=1}^n x_i P_{ni} + 2\lambda_1 \gamma \dot{\gamma} \leq 0.$$

Алгоритм перестройки $K_c(t)$ будет иметь вид

Элементы матрицы Q выражаются следующим образом через элементы матрицы P :

$$\begin{cases} q_1 = 2a_0 P_{21} \\ q_2 = -2(a_1 P_{22} - P_{21}) \\ P_{11} = a_1 P_{21} + a_0 P_{22} \end{cases}$$

Элементы матрицы P выбираются из условий

$$\begin{cases} P_{21} \geq 0 \\ P_{22} \geq \max \left(\frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4a_0}}{2a_0} \frac{1}{a_1} \right) \\ P_{11} = a_1 P_{21} + a_0 P_{22} \end{cases}$$

Собственные числа матрицы Q :

$$\begin{cases} r_1(Q) = 2a_0 P_{21} \\ r_2(Q) = 2(a_1 P_{22} - P_{21}) \end{cases}$$

Таким образом, с помощью указанной выше методики могут быть определены области изменения параметров алгоритма самонастройки.

Литература

- Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления: учеб. пособие для студентов, специализирующихся в области автоматического управления техническими системами / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. – Минск: БГТУ, 2006. – 476 с.
- Ульянов, Н. И. Исследование основных каналов управления процессом брагоректификации и разработка их динамических моделей / Н. И. Ульянов // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информ. – 2007. – Вып. XV. – С. 118–121.
- Мандельштейн, М. Л. Автоматические системы управления технологическим процес-