

УДК 66.011.001.57:677.842.41

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ И ПРОБЛЕМЫ ИНТЕГРИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ НАЛИЧИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.
ЧАСТЬ 1**

Д.С. Дворецкий, С.И. Дворецкий

Кафедра «Технологическое оборудование и прогрессивные технологии», ТГТУ

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: гибкость химико-технологических процессов (ХТП); «жесткие» и «мягкие» ограничения; интегрированное проектирование; неопределенности; непрерывные и периодические ХТП; одно- и двухэтапные задачи; оптимальное управление; система управления; стабилизация режимов; стохастическая оптимизация.

Аннотация: Сформулирована общая задача интегрированного (совместного) проектирования энерго- и ресурсосберегающих ХТП и систем управления их режимами при наличии неопределенности физико-химических, технологических и экономических исходных данных для проектирования. Разработана многоэтапная стратегия (методология) интегрированного проектирования. В зависимости от изменения неопределенности на этапах проектирования и эксплуатации ХТП формулируются одно- и двухэтапные задачи стохастической оптимизации с «жесткими» и «мягкими» (вероятностными) ограничениями. Рассматриваются методы и алгоритмы решения одно- и двухэтапных задач стохастической оптимизации, а также задач оптимального управления непрерывными и периодическими ХТП, возникающих при интегрированном проектировании.

Введение

Проблема совместного проектирования «гибких» ХТП и систем автоматического управления режимами их функционирования ставилась и частично решалась на протяжении многих десятилетий (Кафаров В.В., Девятов Б.Н., Grossmann I.E., Pistikopoulos E.N., Morari M., Анисимов И.В., Островский Г.М., Бодров В.И. и др. [1 – 3, 6 – 9]). Однако до настоящего времени нет законченной теории и сравнительно простых вычислительных алгоритмов для комплексного решения этой сложной многокритериальной проблемы.

Разработанная нами методология создания гибких автоматизированных ХТП предполагает интегрированное проектирование технологических процессов, аппаратов и систем автоматического управления в рамках единой задачи оптимального проектирования. Целью интегрированного проектирования является обеспе-

чение выпуска качественной конкурентоспособной продукции и соответствующего (мировым стандартам) уровня энерго- и ресурсосбережения производства. При этом следует добиваться выполнения заданных регламентом производства технологических условий осуществления ХТП, которые фигурируют в задаче оптимального проектирования в форме ограничений. Ограничения могут задаваться в «жесткой» и/или «мягкой» (вероятностной) формах. Проблема выполнения ограничений сильно осложняется наличием неопределенности информации, как-то: неточностью физических и химических закономерностей, лежащих в основе математических моделей ХТП и систем управления; изменением коэффициентов моделей (например, констант скоростей химических реакций, коэффициентов диффузии, тепло- и массопередачи и др.) во время эксплуатации процесса; случайными изменениями технологических переменных (температуры, скорости и состава потоков сырья и др.).

В этом случае возникает необходимость создания гибких ХТП. Под гибкостью ХТП здесь понимается его способность к управлению (управляемость) и сохранению своего функционального назначения (робастность) при случайном изменении внутренних и внешних неопределенных параметров. ХТП будем называть гибким, если на этапе его эксплуатации условия осуществления процесса, задаваемые технологическим регламентом, выполняются независимо от случайного изменения неопределенных параметров в заданной области за счет соответствующего выбора на этапе проектирования векторов конструктивных параметров и управляющих воздействий (при решении одноэтапной задачи оптимизации) или соответствующей подстройки управляющих воздействий на этапе эксплуатации ХТП (при решении двухэтапной задачи оптимизации). Таким образом, гибкость ХТП в статике и динамике определяется конструктивными и режимными переменными ХТП и обеспечивается за счет соответствующего выбора управляющих воздействий, реализуемых системой автоматического управления.

Стремление добиться максимальной эффективности функционирования химического процесса с точки зрения энерго- и ресурсосбережения, как правило, приводит к выбору таких конструктивных параметров аппарата (установки), при которых ухудшаются его свойства управляемости и робастности. В этом случае для обеспечения гибкости процесса требуется использование сложных, а следовательно, дорогостоящих систем автоматического управления. В то же время для улучшения динамических свойств процесса и снижения стоимости системы управления часто оказывается достаточно небольших изменений в конструкции аппаратного оформления процесса или его конструктивных параметров. Правда подобные меры могут привести к некоторому ухудшению других технико-экономических показателей функционирования ХТП.

Таким образом, оптимальные конструктивные параметры аппаратного оформления ХТП и режимы его функционирования должны выбираться из условия разумного компромисса между эффективной работой химического процесса с точки зрения энерго- и ресурсосбережения и «хорошими» динамическими свойствами процесса по каналам управления (регулирования). Этого можно добиться только на основе проектирования ХТП, его аппаратного оформления и системы автоматического управления в рамках единой постановки задачи интегрированного проектирования.

1 Постановка задачи интегрированного проектирования гибких автоматизированных ХТП

Сформулируем в общем виде задачу интегрированного проектирования ХТП и системы автоматического управления (САУ) его режимами (статическими и/или динамическими). Пусть нам известна структура ХТП (технологическая схе-

ма) и некоторая информация о векторе неопределенных параметров (возмущающих воздействий) $\xi \in \Xi$. Как правило, вектор ξ состоит из двух подвекторов $\xi^1 \in \Xi^1$ и $\xi^2 \in \Xi^2$, в подвектор ξ^1 входят параметры, которые могут быть идентифицированы на этапе эксплуатации ХТП, а в подвектор ξ^2 – неопределенные параметры как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации ХТП.

При интегрированном проектировании требуется определить: вариант $a \in A$ аппаратного оформления (АО) ХТП, векторы конструктивных параметров $d(a) \in D$ и режимных (управляющих) переменных $z \in Z$ (или оптимальных заданий $z_{\text{зад}}$ регуляторам САУ), класс $b \in B$, структуру $h_b \in H$ и вектор настроечных параметров $s(h_b) \in S$ САУ, при которых независимо от изменения $\xi \in \Xi$ усредненные показатели энерго- и ресурсосбережения $I_i, i = \overline{1, m}$, достигают оптимальных значений и в то же время не уступают мировым достижениям в этой области, а другие требования технического задания на проектирование ХТП и системы управления, например, по качеству выпускаемой продукции, экологической безопасности и другим технико-экономическим показателям выполняются безусловно (жестко) или с заданной (но достаточно высокой) вероятностью.

Введем векторную целевую функцию $I = (I_1, I_2, \dots, I_m)$ энерго- и ресурсосбережения и вектор-функцию $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n)$ условий осуществления ХТП, а также множество $F \subset E^p$ показателей энерго- и ресурсосбережения, соответствующих мировому уровню развития химических технологий, и множество $Q \subset E^q$ показателей технологических условий, утвержденных в ТЗ на проектирование. Будем считать, что на множестве F введено частичное упорядочение \succ и заданы (как правило, алгоритмически) функциональные зависимости $\alpha: \omega \rightarrow F, \beta: \omega \rightarrow Q$, где ω – ассортимент выпускаемой продукции.

Тогда задача интегрированного проектирования энерго- и ресурсосберегающих ХТП и систем автоматического управления заключается в определении таких $a^* \in A, b^* \in B, h^* \in H, d^* \in D, z^* \in Z, s^* \in S$, что $\forall \omega \in \Omega$,

$$I^* = \underset{a, d, b, h_b}{\text{opt}} E_{\xi^1} \left\{ \underset{z, s}{\text{opt}} E_{\xi^2} \left\{ I(a, b, h_b, d, z, \xi^1, \xi^2) \right\} \right\} \Big| \left. \max_{\xi^2 \in \Xi^2} \varphi_j(d, z, \xi^1, \xi^2) \leq 0, j \in J \right\} \succ \alpha(\omega) \quad (1)$$

при связях в форме уравнений математических моделей ХТП непрерывного действия (уравнения статики ХТП и динамики функционирования САУ, например, с типовыми регуляторами ПИ-, ПИД- и др.) или полунепрерывного (периодического) действия (уравнения динамики ХТП), а также при выполнении условий гибкости (работоспособности) ХТП в «жесткой» форме [9, 10]

$$\chi(d) = \max_{\xi^1 \in \Xi^1} \min_z \max_{\xi^2 \in \Xi^2} \max_{j \in J} \varphi_j(d, z, \xi^1, \xi^2, \omega) \leq 0 \quad (2)$$

или в вероятностной форме [5]

$$\text{Вер}_{\xi^2} \left\{ \varphi_j(a, b, h_b, d, z, s, \xi^1, \xi^2, \omega) \leq \beta(\omega), j \in J \right\} \geq \rho_{\text{зад}}, \quad (2')$$

где $E_{\xi} \{\square\}$ – математическое ожидание $\{\square\}$ на множестве Ξ неопределенных параметров, $\Xi = \{\xi \mid \xi_k^- \leq \xi_k \leq \xi_k^+, k = \overline{1, m}\}$; $\text{Вер}_{\xi} \{\square\}$, ρ – значения вероятности и гарантированной (заданной) вероятности выполнения технологических условий, соответственно; J – множество индексов ограничений, $J = \{\overline{1, m}\}$.

Решение сформулированной многокритериальной задачи стохастической оптимизации прямыми методами невозможно, поскольку до настоящего времени не формализованы процедуры выбора типа аппаратного оформления, класса и структуры системы автоматического управления, а также из-за высокой размерности задачи, существенной нелинейности ХТП и сложности алгоритмов вычисления компонент вектор-функции I и индекса гибкости ХТП. Кроме того, заметим, что при решении задачи (1), (2) возникает необходимость неоднократного решения внутренней многокритериальной задачи оптимизации при фиксированных значениях $\hat{a}, \hat{b}, \hat{h}_b, \hat{d}, \hat{\xi}^1, \omega$: $\text{opt}_{z,s} E_{\xi^2} \{I(\hat{a}, \hat{b}, \hat{h}_b, \hat{d}, z, \hat{\xi}^1, \xi^2)\}$ при условиях

$$\max_{\xi^2 \in \Xi^2} \varphi_j(\hat{a}, \hat{b}, \hat{h}_b, \hat{d}, z, \hat{\xi}^1, \xi^2) \leq 0, j \in J,$$

или $\text{Вер}_{\xi^2} \left\{ \varphi_j(\hat{a}, \hat{b}, \hat{h}_b, \hat{d}, z, \hat{\xi}^1, \xi^2, \omega) \leq \beta(\omega), j \in J \right\} \geq \rho_{\text{зад}}.$

При этом следует помнить, что решение внутренней задачи оптимизации позволяет определить оптимальные задания z^* регуляторам САУ и далее здесь же следует рассчитывать оптимальные (в смысле заданных критериев качества переходных процессов в САУ) настройки регуляторов для заданной структуры \hat{h} САУ. При оптимальном проектировании полунепрерывных (периодических) ХТП модель описывается системой дифференциальных уравнений вида

$$\begin{aligned} \dot{y} &= f(y, \hat{d}, u, \hat{\xi}^1, \xi^2), \\ y(t_0) &= y_0, \quad y(t_k) = y, \end{aligned} \quad (3)$$

где y – вектор переменных состояния ХТП, $y \in Y(\hat{d}, \xi^2)$; y – вектор желаемых переменных, достигаемый в конечный момент времени t_k ; u – вектор управлений, $u \in U(y, \hat{d}, \xi^2)$.

Пусть $y(t) = y(\hat{d}, \xi^2, t_0, y_0, u)$ – решение системы (3), соответствующее u .

Определим функционал $\mathfrak{Z}(\hat{d}, u, \xi^2) = \int_{t_0}^{t_k} \Phi(\hat{d}, y, u, \xi^2) dt$, где момент времени t_k определяется из условия достижения заданного состояния y ХТП. Решая задачу оптимального управления и находя оптимальное управление u^* и значение функционала $\check{\mathfrak{Z}}(\hat{d}, u^*, \xi^2)$, можно определить критерий эффективности функ-

ционирования ХТП $I(d) = \mathfrak{Z}(d, u^*, \xi^2)$. Таким образом, при фиксированном значении вектора \hat{d} всякий раз необходимо решать задачу оптимального управления полунепрерывным (периодическим) ХТП, а оптимальное значение вектора d^* определяется из условия минимума критерия $I(d)$.

2 Стратегия интегрированного проектирования

Используя системный подход, нами предложена редукция задачи стохастического программирования (1), (2) к последовательности итерационно решаемых высокоэффективными традиционными методами детерминированных задач нелинейного программирования и оптимального управления. При этом обеспечивается поэтапное сужение множеств A , D , B , H и Z . Блок-схема многоэтапной стратегии интегрированного проектирования гибких ХТП и систем автоматического управления показана на рис. 1.

В соответствии с разработанной методологией интегрированного проектирования итерационно решаются три основные задачи: 1) генерирование альтернативных вариантов ХТП, удовлетворяющих условиям гибкости в жесткой или мягкой форме; 2) выбор альтернативных классов и структур САУ ХТП, удовлетворяющих условиям структурной наблюдаемости и управляемости ХТП с заданными динамическими свойствами по каналам управления; 3) решение одно- или двухэтапной задач оптимизации конструктивных и режимных (управляющих) переменных комплекса «ХТП – система управления» в условиях неопределенности по векторному критерию, включающему показатели качества производимой продукции, энерго- и ресурсосбережения, а также технико-экономические показатели производства.

В качестве альтернативных классов систем автоматического управления будем рассматривать замкнутые (с обратной отрицательной связью) и разомкнутые системы, предназначенные для решения задач стабилизации режимов, адаптивной статической оптимизации, динамической оптимизации (определение программы управления), программного управления (реализации известной программы управления) и оптимального управления нестационарными режимами ХТП (для полунепрерывных и периодических процессов).

Выбор класса и структуры САУ осуществляется с использованием множества регулируемых (наблюдаемых) переменных и управляющих воздействий, полученных из анализа структурной матрицы уравнений динамики ХТП. При этом учитываются наблюдаемость выходных переменных ХТП, оценка затрат на разработку необходимых датчиков, приборов, возможность и точность прогноза выходных переменных по косвенным показателям, управляемость ХТП с той или иной комбинацией управляющих воздействий. Альтернативные классы и структуры САУ исследуются методом имитационного моделирования в порядке их ранжирования по критерию экономической целесообразности. Для допустимых структур САУ проводится исследование динамических показателей (регулируемости, инерционности и др.) ХТП по каналам управления (регулирования). В том случае, если управляемые в статике ХТП имеют неудовлетворительные динамические характеристики, то производится коррекция конструктивных и режимных параметров ХТП (найденных на первом этапе), либо выбираются новые типы АО ХТП.

Для решения задач синтеза энерго- и ресурсосберегающего управления нелинейными (по фазовым координатам) ХТП в замкнутой САУ нами применяются высокоэффективные методы АКОР по критерию обобщенной работы академика Красовского А.А.

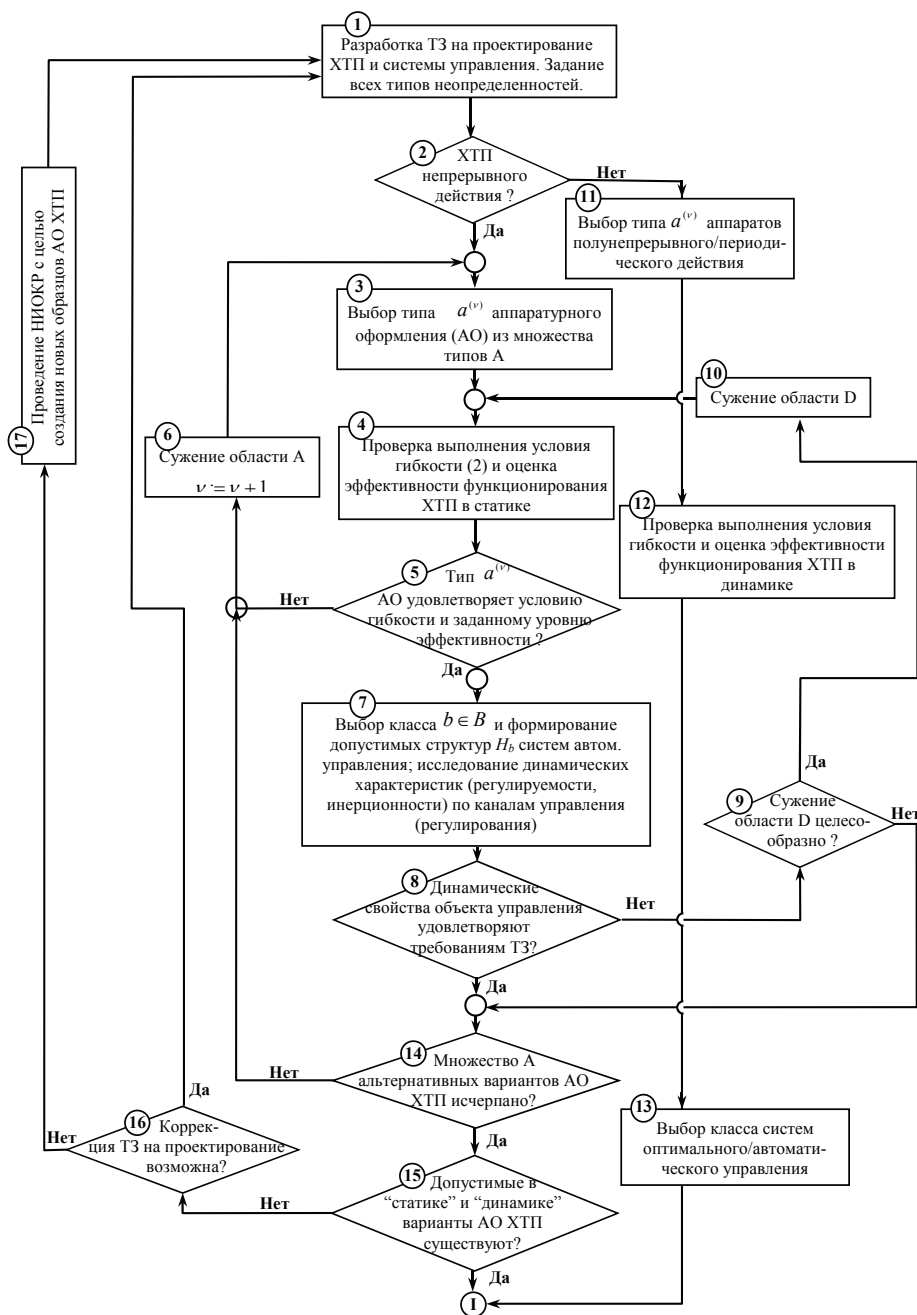


Рис. 1 Блок-схема методологии интегрированного проектирования ХТП и системы автоматического управления его режимами

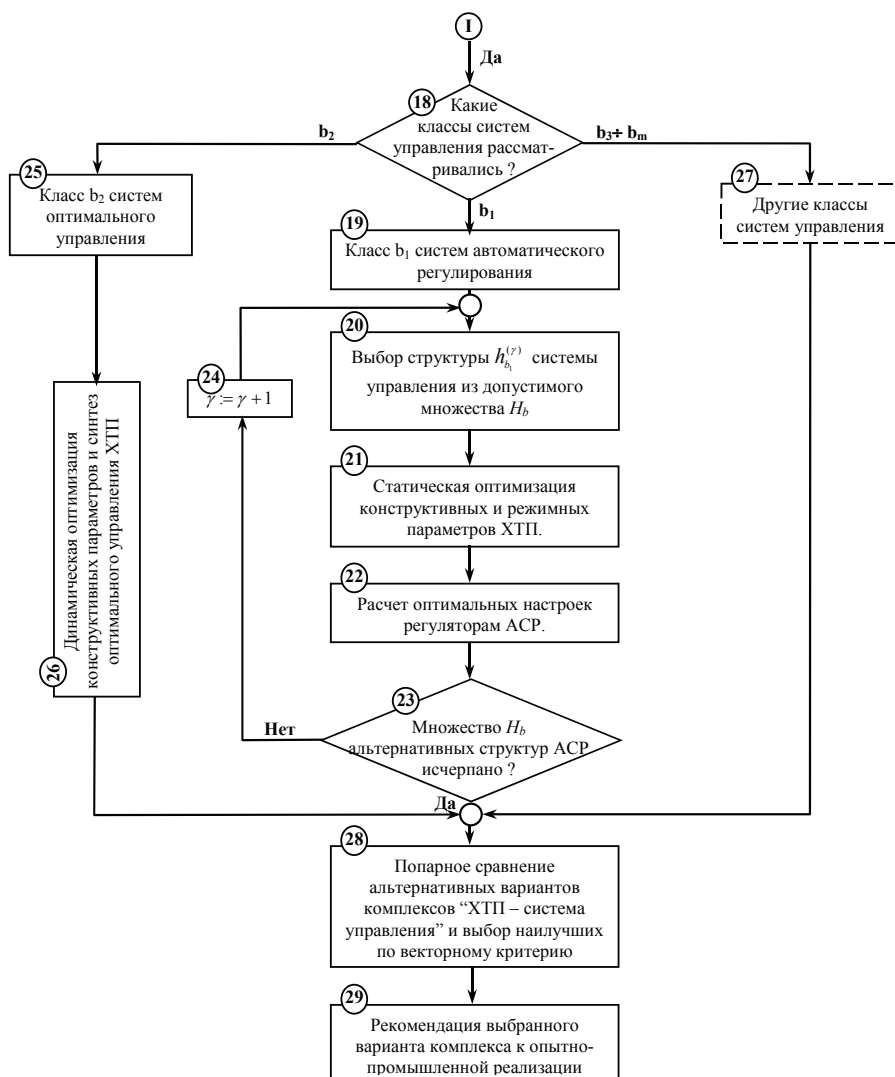


Рис. 1 (продолжение)

На завершающем этапе интегрированного проектирования осуществляется решение многокритериальной задачи оптимизации для альтернативных комплексов «ХТП – САУ». В ходе имитационных исследований помимо вычисления оценок показателей энерго- и ресурсосбережения, экономической целесообразности также определяется техническое задание на точность и быстродействие информационно-измерительной подсистемы, алгоритмов оптимального управления, исполнительных механизмов и устройств управления, на разработку подсистем адаптации моделей и алгоритмов управления. По результатам имитационных исследований проверяется достижимость поставленных целей функционирования ХТП и осуществимость требований технического задания. В том случае, если эти требования не достижимы, осуществляется переход к новым обликам АО ХТП или выбору новой структуры ХТП.

3 Синтез гибких (работоспособных) ХТП при наличии неопределенности (блок № 4, рис. 1)

3.1 Постановки задач

Для формулировки задачи оптимизации с учетом неопределенностей необходимо задать форму целевой функции и определить ограничения. В основе этого определения лежит концепция двух этапов ХТП: этапа проектирования (на этом этапе неопределенность присутствует практически всегда) и этапа эксплуатации. На втором этапе возможны следующие случаи.

Случай 1. На этапе эксплуатации ХТП область неопределенных параметров та же, что и на этапе проектирования. В этом случае необходимо найти вектор z , позволяющий выполнить ограничения (2) в жесткой форме при всех $\xi \in \Xi$.

Условие гибкости для этого случая записывается в виде

$$\exists z \forall \xi \in \Xi \forall j \in J \varphi_j(d, z, \xi) \leq 0$$

или

$$F_1(d) = \min_z \max_{j \in J} \max_{\xi \in \Xi} \varphi_j(d, z, \xi) \leq 0,$$

а задача оптимизации имеет вид

$$I_1^* = \min_d E_\xi \{I(d, z, \xi)\}$$

при условии $F_1(d) \leq 0$, причем вектор z должен быть решением последнего неравенства.

В работе [11] показано, что сформулированная задача может быть преобразована к виду $I_1^* = \min_{d, z} E_\xi \{I(d, z, \xi)\}$ при условии $\max_{j \in J} \max_{\xi \in \Xi} \varphi_j(d, z, \xi) \leq 0$.

В случае использования мягких (вероятностных) ограничений условие гибкости можно представить в виде

$$\text{Вер}_\xi \left[\varphi_j(d, z, \xi) \leq 0 \right] = \int_{\hat{\Xi}} P(\xi) d\xi \geq \rho_{\text{зад}}, \hat{\Xi} = \hat{\Xi}(d) = \{ \xi : \varphi_j(d, z, \xi) \leq 0, j \in J, \xi \in \Xi \},$$

а задача оптимизации имеет вид

$$\min_{d, z} E_\xi \{I(d, z, \xi)\} \quad (4)$$

при выполнении мягкого условия гибкости

$$\text{Вер}_\xi \left[\max_{j \in J} \varphi_j(d, z, \xi) \leq 0 \right] \geq \rho_{\text{зад}}, \quad (5)$$

где $P(\xi)$ – плотность распределения вероятности в области Ξ , $\rho_{\text{зад}}$ – заданный уровень вероятности выполнения ограничений.

Сформулированные выше задачи стохастической оптимизации относятся к классу так называемых одноэтапных задач. Они находят наиболее широкое применение в практике проектирования ХТП.

Случай 2. На этапе эксплуатации неопределенные параметры ξ могут быть определены в каждый момент времени и управляющие переменные z могут быть использованы для обеспечения выполнения ограничений. Условие гибкости ХТП в этом случае запишется как

$$\forall \xi \in \Xi \exists z \forall j \in J \varphi_j(d, z, \xi) \leq 0$$

или

$$F_2 = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} \varphi_j(d, z, \xi) \leq 0,$$

а задача стохастической оптимизации с жесткими ограничениями оптимизации имеет вид

$$I_2^* = \min_d E_{\xi} \left\{ \min_z I(d, z, \xi) \mid \varphi_j(d, z, \xi) \leq 0, j \in J \right\} = \min_d \int_{\Xi} I^{\oplus}(d, \xi) P(\xi) d\xi,$$

где $I^{\oplus} = \min_z I(d, z, \xi) \mid \varphi_j(d, z, \xi) \leq 0, j \in J$.

Пусть d^* – решение задачи, тогда при $d = d^*$ может быть гарантирована гибкость (работоспособность) ХТП. Действительно, вычисление $E_{\xi} \{ I^{\oplus}(d, \xi) \}$ предполагает возможность решения задачи $\min_z I(d, z, \xi) \mid \varphi_j(d, z, \xi) \leq 0, j \in J$ при всех $\xi \in \Xi$, а значит существование вектора z для каждого ξ , при котором выполнены ограничения (2). Однако при решении задачи определения I_2^* посредством некоторого вычислительного метода может случиться, что при некоторых d и ξ ограничения (2) не могут быть выполнены. Обычно в этой ситуации вычислительный процесс прекращается. Поэтому ограничения по гибкости целесообразно ввести в явном виде в постановку задачи. Тогда оптимизационная задача формулируется следующим образом

$$I_2^* = \min_d E_{\xi} \{ I^{\oplus}(d, \xi) \} \quad (6)$$

при условии

$$F_2(d) \leq 0. \quad (7)$$

Это так называемая двухэтапная задача стохастической оптимизации с жесткими ограничениями.

В случае использования мягких (вероятностных) ограничений условие гибкости можно записать в виде $\rho_{\text{зад}} - \text{Вер} \{ \xi \in \Xi^{\otimes} \} \leq 0$, где $\Xi^{\otimes}(d) = \left\{ \xi : \min_z \max_{j \in J} \varphi_j(d, z, \xi) \leq 0, \xi \in \Xi \right\}$, а значение целевой функции $I^{\oplus}(d, \xi)$ находится из решения задачи

$$I^{\oplus}(d, \xi) = \begin{cases} \int_{\Xi^{\otimes}} \left(\min_z I(d, z, \xi) \mid \varphi_j(d, z, \xi) \leq 0, j \in J \right) P(\xi) d\xi & \text{если } \xi \in \Xi^{\otimes}; \\ \int_{\Xi \setminus \Xi^{\otimes}} \left(\min_z \left[I(d, z, \xi) + A \cdot \max_{j \in J^{\otimes}} \varphi_j(d, z, \xi), 0 \right] \right) P(\xi) d\xi & \text{если } \xi \notin \Xi^{\otimes}, \end{cases}$$

где A – штрафной коэффициент; J^{\otimes} – множество индексов ограничений, за нарушение которых берется штраф.

Отметим, что если существует такое d , что $F_2(d) \leq 0$, то при $\rho_{\text{зад}} = 1$ оптимизационная задача с мягкими ограничениями переходит в задачу с жесткими ограничениями.

Случай 3. Вектор неопределенных параметров ξ состоит из двух подвекторов ξ^1 и ξ^2 , т.е. $\xi = (\xi^1, \xi^2)$. В подвектор ξ^1 входят параметры, которые могут быть идентифицированы на этапе эксплуатации ХТП, а в подвектор ξ^2 – параметры, имеющие неопределенности на этапе эксплуатации те же, что и на этапе проектирования. Пусть при этом $\xi^1 \in \Xi^1$ и $\xi^2 \in \Xi^2$. Для этого случая двухэтапная задача стохастического программирования имеет вид

$$I_3^* = \min_{d \in D} E_{\xi^1} \left\{ I^\oplus(d, \xi^1) \right\}$$

при выполнении условия гибкости ХТП

$$F_3(d) = \max_{\xi^1 \in \Xi^1} \min_z \max_{\xi^2 \in \Xi^2} \max_{j \in J} \varphi(d, z, \xi^1, \xi^2) \leq 0,$$

где

$$I^\oplus = \min_z E_{\xi^2} \left\{ I(d, z, \xi^1, \xi^2) \left| \max_{\xi^2 \in \Xi} \varphi_j(d, z, \xi^1, \xi^2) \leq 0, j \in J \right. \right\}$$

или

$$I^\oplus = \min_z E_{\xi^2} \left\{ I(d, z, \xi^1, \xi^2) \left| \text{Вер}_{\xi^2} \left[\varphi_j(d, z, \xi^1, \xi^2) \leq 0 \right] \geq \rho_{\text{зад}}, j \in J \right. \right\}.$$

Таким образом, оптимизационная задача при проектировании ХТП может быть сформулирована с учетом различных уровней информации о ХТП, доступной на этапе его эксплуатации. Каждое решение дает оптимальный вариант ХТП для данного уровня информации. Следовательно, при проектировании нужно учитывать, что само получение информации связано с определенными затратами. Разработка более точных моделей, установка новых измерительных приборов и систем автоматического управления для стабилизации неопределенных параметров повышают уровень доступной информации о ХТП, но требуют дополнительных затрат. При этом возникает важная проблема выбора оптимального (или разумного) уровня экспериментальной информации в качестве исходных данных для проектирования ХТП.

3.2 Вычисление функции гибкости ХТП и методы решения оптимизационных задач

Методы решения одноэтапных задач стохастической оптимизации с жесткими ограничениями изучены в работах [10, 11], здесь остановимся на изучении методов и алгоритмов решения задач стохастической оптимизации с мягкими ограничениями и двухэтапных задач.

В терминах теории A -задач оптимизации [5] одноэтапную задачу с вероятностными ограничениями (4), (5) можно переформулировать следующим образом: требуется найти m -мерный вектор постоянных величин $\alpha^* = (\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_m^*)$, векторы конструктивных d_{α^*} и режимных z_{α^*} переменных такие, что

$$I(d_{\alpha^*}, z_{\alpha^*}) = \min_{\alpha \in A} \left\{ \min_{d, z} \sum_{k=1}^K \gamma_k \cdot I(d, z, \xi^k) \mid \varphi_j(d, z, \xi^k) \leq \alpha_j, j \in J \right\},$$

где $A = \left\{ \alpha \mid \forall j \text{ Вер}_\xi [\varphi_j(d_\alpha, z_\alpha, \xi) \leq 0] \geq \rho_{\text{зад}} \right\}$, γ_k – весовые коэффициенты,

которые присвоены каждой точке ξ^k , $\sum_{k=1}^K \gamma_k = 1$.

Алгоритм 1.

Шаг 1. Положить $v = 0$ и выбрать начальное приближение вектора $\alpha^v = (\alpha_1^v, \alpha_2^v, \dots, \alpha_m^v)$.

Шаг 2. Методом последовательного квадратичного программирования решить задачу нелинейного программирования

$$I(d_\alpha, z_\alpha) = \min_{d, z} \sum_{k=1}^K \gamma_k \cdot I(d, z, \xi^k)$$

при ограничениях $\varphi_j(d, z, \xi^k) \leq \alpha_j^v, j \in J, k \in \overline{1, K}$.

Пусть точка $(d_{\alpha^v}, z_{\alpha^v})$ – решение этой задачи.

Шаг 3. В точке $(d_{\alpha^v}, z_{\alpha^v})$ вычисляются вероятности выполнения ограничений с использованием имитационной модели стохастического технологического объекта и проверяется выполнение условий

$$\text{Вер}_\xi \left\{ \varphi_j(d_{\alpha^v}, z_{\alpha^v}, \xi) \leq 0 \right\} \geq \rho_{\text{зад}}, j \in J.$$

Шаг 4. Если вероятностные ограничения не выполняются для каких-то номеров $j \in J$, т.е. $\alpha^v \notin A$, то включается алгоритм входа в допустимую область A . Далее принять $v := v + 1$ и перейти к шагу 2. В противном случае перейти к следующему шагу 5.

Шаг 5. Определить вектор α^* из решения внешней A -задачи оптимизации

$$I(d_{\alpha^*}, z_{\alpha^*}) = \min_{\alpha \in A} I(d_\alpha, z_\alpha).$$

Рассмотрим далее самостоятельную задачу вычисления функции гибкости $F_2(d)$, которая используется в двухэтапной задаче стохастической оптимизации [11]

$$F_2(d) = \max_{\xi \in \Xi, \mu} \left\{ \mu \mid \min_z \max_{j \in J} \varphi_j(d, z, \xi) \geq \mu \right\},$$

что эквивалентно

$$F_2 = \max_{\xi \in \Xi, \mu} \left\{ \mu \mid \max_{j \in J} \varphi_j(d, z^i, \xi) \geq \mu, \forall z^i \in Z \right\}.$$

Введем вспомогательное конечное множество $S^{(p)}$ так называемых критических точек: $S^{(p)} = \{z^i : i = 1, \dots, p\}$, где p – число этих точек, v – номер итерации.

Рассмотрим задачу

$$F_2 = \max_{\xi, \mu} \mu \quad (8)$$

при условии

$$\max_{j \in J} \varphi_j(d, z^k, \xi) \geq \mu, \quad k = 1, \dots, p. \quad (9)$$

Рассматривая индекс j как дискретную переменную, получим

$$F_2^p \equiv \mu_p = \max_{j_1 \in J, \dots, j_p \in J} \dots \max_{\xi, \mu} \mu \quad (10)$$

при условии $\varphi_{j_k}(d, z^k, \xi) \geq \mu$, $k = 1, \dots, p$, где переменная j_k соответствует точке z^k .

В работе [11] показано, что $F_2^p \geq F_2$, где F_2^p – верхняя оценка величины F_2 . Сформулированная задача оптимизации является смешанной дискретно-непрерывной задачей, в которой переменные j_1, \dots, j_p являются дискретными, а переменные ξ, μ – непрерывными.

Алгоритм решения задачи (8), (9), основанный на постоянном расширении множества $S^{(p)}$ и использовании решения задачи (10), можно записать в следующем виде.

Алгоритм 2.

Шаг 1. Положить $v = 0$ и выбрать начальное множество z – критических точек $S^{(p)} = \{z^i, i = 1, \dots, p\}$.

Шаг 2. Определить величину μ_p , решая задачу (10). Пусть ξ^v – решение этой задачи.

Шаг 3. Определить θ_v , решая задачу

$$\theta(d, \xi) = \min_{z \in Z} \max_{j \in J} \varphi_j(d, \xi)$$

при $\xi = \xi^v$. Пусть z^v – решение этой задачи.

При этом можно утверждать [11], что выполняется следующее соотношение

$$\theta_v \equiv \theta(d, \theta^v) \leq \max_{\xi \in \Xi} \theta(d, \xi) \equiv F_2.$$

Шаг 4. Проверить выполнение условия

$$|\mu_p - \theta_v| \leq \varepsilon,$$

где ε – достаточно малое число. Если это условие выполняется, то решение задачи (8), (9) получено, в противном случае перейти к следующему шагу.

Шаг 5. Сформировать новое множество критических точек $S^{(p+1)} = S^p \cup \{z^v\}$, принять $v := v + 1$ и перейти к шагу 2.

Перейдем к рассмотрению алгоритма решения двухэтапной задачи стохастического программирования (6), (7). Пусть $S_2^{(v)} = \{\xi^i : i \in I^{(v)}\}$ – некоторое множество критических точек, v – номер итерации, $I^{(v)}$ – множество номеров точек в $S_2^{(v)}$, S_1 – совокупность аппроксимационных точек.

Алгоритм 3.

Шаг 1. Принять $v = 0$. Выбрать совокупность аппроксимационных точек S_1 и начальное множество критических точек $S_2^{(v)}$.

Шаг 2. Решить задачу $I^{(v)} = \min_{d, z^k, z^i} \sum_{k \in K} \gamma^k I(d, z^k, \xi^k)$

при ограничениях $\varphi_j(d, z^k, \xi^k) \leq 0, k \in K; \varphi_j(d, z^i, \xi^i) \leq 0, i \in I^{(v)}$.

Пусть $z^{k,(v)}, z^{i,(v)}, d^{(v)}$ – решение этой задачи.

Шаг 3. С использованием алгоритма 2 вычислить значение $F_2(d)$. При этом будет получено некоторое значение $\xi^{(v)*}$. Проверить выполнение условия $F_2(d) \leq 0$. Если оно выполняется, то решение задачи получено. В противном случае перейти к следующему шагу 4.

Шаг 4. Образовать новое множество ξ – критических точек $S_2^{(v+1)} = S_2^{(v)} \cup \{\xi^{(v)*}\}$, принять $v := v + 1$ и перейти к шагу 2.

Недостаток алгоритма заключается в том, что на каждой итерации приходится проводить крайне трудоемкую процедуру вычисления функции гибкости $F_2(d)$.

3.3 Синтез энерго- и ресурсосберегающего управления нелинейными химическими процессами (блок № 26, рис. 1)

Для непрерывных ХТП, как правило, формулируется задача оптимальной стабилизации переменных состояния, для периодических ХТП – задача программного управления, для полунепрерывных процессов – задача оптимального управления.

Задачи оптимальной стабилизации и программного управления формулируются следующим образом: требуется найти управление $u^*(t) \in U$, доставляющее минимум функционалу качества вида

$$J^*(u^*(t), \bar{\xi}) = \min_{u \in U} \left[\frac{1}{2} \langle (y(t_k) - z(t_k)), F \cdot (y(t_k) - z(t_k)) \rangle + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} \langle (y(t) - z(t)), Q(t) \cdot (y(t) - z(t)) \rangle + \langle u(t), G(t), u(t) \rangle dt \right] \quad (11)$$

при связях в форме уравнений математической модели динамики нелинейного процесса

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= \varphi(y(t), u(t), \bar{\xi}); \\ y(t_0) &= y_0 \end{aligned} \quad (12)$$

и ограничениях на качественные показатели переходного процесса в системе автоматического управления.

Здесь $y(t), z(t)$ – n -мерные векторы текущего и заданного состояния (программы изменения) процесса соответственно; $u(t)$ – m -мерный вектор управления; $\varphi(\square)$ – нелинейная по y и u вектор-функция; $F, Q(t)$ – положительно полуопределенные матрицы ($n \times n$); $G(t)$ – симметричная положительно определенная матрица ($m \times m$); $\langle \square \rangle$ – скалярное произведение векторов.

Для решения задачи (11), (12) нами применяется метод “последовательной линеаризации”, суть которого состоит в замене исходной нелинейной задачи последовательностью линейных. Каждая линейная задача последовательности получается путем линеаризации нелинейной вектор-функции $\varphi(\square)$ в окрестности траектории состояния и управления, полученных при решении предыдущей линейной задачи. В первом приближении функция $\varphi(\square)$ линеаризуется в окрестности траектории $y(t) = z(t)$ и управления $u(t) = 0$ для задачи программного управления ($y(t) \equiv y^{\text{зад}}, u(t) \equiv 0$ – для задачи оптимальной стабилизации). Система линеаризованных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{y}^{(k+1)}(t) &= A^{(k)}(t)y^{(k+1)}(t) + B^{(k)}(t)u^{(k+1)}(t) + h^{(k)}(t); \\ y^{(k+1)}(t_0) &= y_0, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A^{(k)}(t) &= \left. \frac{\partial \varphi(y, u, \bar{\xi})}{\partial y} \right|_{\substack{y=y^{(k)}(t); \\ u=u^{(k)}(t)}}; \quad B^{(k)}(t) = \left. \frac{\partial \varphi(y, u, \bar{\xi})}{\partial u} \right|_{\substack{y=y^{(k)}(t); \\ u=u^{(k)}(t)}}; \quad (13) \\ h^{(k)}(t) &= \varphi(y^{(k)}, u^{(k)}) - A^{(k)}(t)y^{(k)}(t) - B^{(k)}(t)u^{(k)}(t). \end{aligned}$$

Задача (11), (13) линейна по переменным $y^{(k+1)}(t), u^{(k+1)}(t)$ и ее решение определяется известным соотношением для оптимального управления [12]. Последовательность линейных задач решается до тех пор, пока при некотором $k = N$ выполняется неравенство

$$\|y^{(N)} - y^{(N-1)}\| \leq \varepsilon. \quad (14)$$

При этом вектор управления $u^{(N)}$ принимается в качестве решения задачи (11), (13), т.е. $u^* = u^{(N)}$.

Сформулируем теперь задачу синтеза оптимального управления нелинейным химическим процессом.

Рассмотрим полуопределенный функционал А.А. Красовского, названный им критерием обобщенной работы

$$J(d, \bar{\xi}, u) = V_3[y(t_k)] + \int_{t_0}^{t_k} Q_3(y, s) ds + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} \sum_{j=1}^r \left[\frac{u_j}{k_j} \right]^2 ds + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} \sum_{j=1}^r \left(k_j \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} \frac{\partial V}{\partial y_i} \right)^2 ds.$$

Первый член функционала – $V_3 [y(t_1)]$ – характеризует точность приведения объекта в заданное состояние в конечный момент времени $s = t_k$. Второй член – $Q_3 [\square]$ – является интегральной оценкой качества переходных процессов или точности реализации заданной программной фазовой траектории объекта. Применительно к ХТП в качестве $V_3 [\square]$ могут быть заданы квадратичные функции невязки между заданными и текущими значениями фазовых и выходных координат объекта (например, выход целевых продуктов, количество примесей в продукте и др.). В качестве $Q_3 [\square]$ целесообразно рассматривать отклонение той или иной технологической переменной (концентрации, температуры и т.п.) от заданных значений (оптимальной программы изменения) в течение всего технологического цикла $[t_0, t_k]$.

Последний член функционала $\frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_k} \sum_{j=1}^r \left(k_j \sum_{i=1}^n \varphi_{ij} \frac{\partial V}{\partial y_i} \right)^2 ds$ можно интерпретировать как затраты на ресурсы управления в замкнутой системе управления.

В соответствии с методом АКОР [13] для детерминированного объекта

$$\dot{y} + F(y, s) = u \quad (15)$$

оптимальным по критерию обобщенной работы $J(d, \bar{\xi}, u)$ являются управления

$$u = -K \frac{\partial V}{\partial y}, \quad (16)$$

где V – решение уравнения $\frac{\partial V}{\partial s} - F^T \frac{\partial V}{\partial y} = -Q_3$, при граничном условии $V_{t=t_1} = V_3$; K – вектор заданных коэффициентов.

Однако можно представить имитационный алгоритм синтеза оптимального управления с использованием прогнозирующей модели [13], описывающей функционирование неуправляемого объекта

$$\dot{y} + F(y, s) = 0; \quad (17)$$

$$\dot{V} = -Q_3(y, s). \quad (18)$$

Решение этой системы определяют в пространстве $(y_1, y_2, \dots, y_n, V)$ интегральные линии-характеристики, расположенные на интегральной поверхности $V(y, s)$. Проекция характеристик на пространство состояний объекта (17) являются фазовыми траекториями, на которых V изменяется в соответствии с уравнением (18). Интегрирование (18) на фазовых траекториях дает с учетом условия $V_{t=t_k} = V_3$ следующее соотношение

$$V(y(t), t) = V_3 [y(t_k)] + \int_{t_0}^{t_k} Q_3 [y(s), s] \cdot ds. \quad (19)$$

Применив к (19) операцию (16), получим вектор оптимальных управлений.

Проведем процедуру численной реализации описанного метода. Интервал времени $[t_0, t_k]$ разбивается на достаточно короткие циклы длиной $\Delta\tau_u$. Для заданного момента времени t (начала цикла $\Delta\tau_u$) измеряется вектор $y(t)$ и формируется $\hat{y}(t) = y(t) + \Delta y$, где Δy – заданное малое смещение, которое задается в качестве начальных условий в математическую модель (17). С использованием математической модели осуществляется прогноз фазовых траекторий на интервале времени $t_0 < s < t_k$ и далее производится расчет функций $V(y(t), t)$ и $V(\hat{y}(t), t)$ по соотношению (19). Далее на основе дискретного аналога выражения (16) вычисляются оптимальные управления, с помощью которых по модели (15) прогнозируется новое состояние объекта $y(t)$ в следующий момент времени t . Вычисленные на некотором v -ом такте управления $u^{(v)}$ воздействует на объект управления в течение $(v+1)$ -го такта, а затем заменяются управлением $u^{(v+1)}$ и т.д.

Описанный алгоритм с прогнозирующей моделью с точностью до ошибок, связанных с дискретизацией (квантованием) во времени, ошибок интегрирования уравнений свободного движения (ошибок модели), ошибок датчиков и численного дифференцирования для определения проекций градиента является точным алгоритмом. Однако при практическом осуществлении каждая из перечисленных ошибок играет определенную роль. В частности, при больших интервалах оптимальности существенное вредное влияние могут иметь место ошибки численного интегрирования уравнений свободного движения.

Выше мы рассмотрели детерминированные задачи оптимального управления, решаемые для некоторого среднего значения $\bar{\xi}$. На самом деле система управления, как и технологическое оборудование, должна проектироваться в условиях неопределенности. Для таких систем рассмотрим следующую задачу оптимизации [14]:

$$J(u) = E \left\{ \int_{t_0}^{t_k} F(y(t, \xi), u(t)) dt \right\} \longrightarrow \min_{u \in U} \quad (20)$$

$$\dot{y} = f(y, u(t), \xi), \quad y(0) = y_0, \quad (21)$$

$$\text{Вер}\{\varphi_j(y(t)) \leq \alpha_j\} \geq \rho, \quad j = \overline{1, \dots, n}, \quad t \in [t_0, t_k], \quad (22)$$

где $y \in R^N$ – вектор состояния, $\xi \in R^L$ – вектор случайных параметров, имеющих известную функцию плотности распределения $P(\xi)$ с некоторой областью определения Ξ_P ; $f(\square)$ – N -мерная вектор-функция, имеющая ℓ_i -ю непрерывную производную по y_i , $i = \overline{1, \dots, N}$ и m_j -ю производную по ξ_j , $j = \overline{1, \dots, L}$; $u(t)$ – вектор-функция управления из некоторого допустимого множества U ; α_j – заданные действительные числа; ρ – заданное значение доверительной вероятности; $F(\square)$, $\varphi(\square)$ – достаточно гладкие функции своих аргументов.

Для практических задач требование гладкости F и φ зачастую не является обременительным, поскольку обычно используются аналитические, например, степенные зависимости.

Будем считать, что $f(\square)$ аналитична по y в R^N и по параметру ξ в области Ξ . Тогда решение $y(t, u(t), \xi)$ также будет аналитично в Ξ_P и может быть представлено сходящимся рядом Тейлора

$$y^{(q)}(t, u(t), \xi) = y^{(q)}(t, u(t), \xi_0) + \sum_{i=1}^N \frac{\partial y^{(q)}(t, u(t), \xi_0)}{\partial \xi^{(i)}} \Delta \xi^{(i)} + \\ + \sum_{i,j=1}^L \frac{1}{2} \frac{\partial^2 y^{(q)}(t, u(t), \xi_0)}{\partial \xi^{(i)} \partial \xi^{(j)}} \Delta \xi^{(i)} \Delta \xi^{(j)} + \dots, \quad q = \overline{1, N},$$

где $y^{(q)}$ – q -я координата вектора решения системы (21), $\Delta \xi = (\xi_0 - \xi)$ – случайный вектор.

Будем считать, что $\xi_0 = E(\xi)$, и обозначим производные решения $y(t, u(t), \xi)$ по координатам вектора ξ через $y_{\xi_i \xi_j}^{(q)}$. Запишем в качестве примера дифференциальное уравнение, позволяющее вычислить $y_{\xi_i \xi_j}^{(q)}$ в точке $\xi = \xi_0$:

$$\frac{dy_{\xi_i \xi_j}^{(q)}}{dt} = \frac{\partial^2 f(y, \xi_0)}{\partial \xi_i \partial \xi_j} + \sum_{k=1}^N \frac{\partial^2 f(y, \xi_0)}{\partial \xi_i \partial y^{(k)}} y_{\xi_j}^{(k)}(t, \xi_0) + \sum_{k=1}^N \frac{\partial^2 f(y, \xi_0)}{\partial \xi_i \partial y^{(k)}} y_{\xi_i}^{(k)}(t, \xi_0) + \\ + \sum_{m=1}^N \frac{\partial f(y, \xi_0)}{\partial y^{(k)}} y_{\xi_i \xi_j}^{(m)}(t, \xi_0) + \sum_{k,m=1}^N \frac{\partial^2 f(y, \xi_0)}{\partial y^{(k)} \partial y^{(m)}} y_{\xi_j}^{(k)}(t, \xi_0) y_{\xi_i}^{(m)}(t, \xi_0) \quad (23)$$

с начальными условиями $y_{\xi_i \xi_j}^{(k)}(0, \xi_0) = 0$.

Аналогичные уравнения легко получить и для других производных.

Далее предположим, что подынтегральная функция $F(y(t, \xi))$ имеет все непрерывные частные производные по y порядка $n \leq m$. Если теперь воспользоваться свойством линейности оператора математического ожидания, то можно получить для функционала $J(u)$ новое выражение

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_k} \left\{ F(y(t, \xi_0)) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L \frac{\partial F(y(t, \xi_0))}{\partial y^{(i)}} \frac{\partial y^{(i)}}{\partial \xi^{(j)}} M\{\Delta \xi^{(j)}\} + \right. \\ + \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L \sum_{q=1}^N \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F(y(t, \xi_0))}{\partial y^{(i)} \partial y^{(q)}} \frac{\partial y^{(q)}}{\partial \xi^{(r)}} \frac{\partial y^{(i)}}{\partial \xi^{(j)}} M\{\Delta \xi^{(j)} \Delta \xi^{(r)}\} + \quad (24) \\ \left. + \sum_{r=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^L \frac{1}{2} \frac{\partial F(y(t, \xi_0))}{\partial y^{(i)}} \frac{\partial^2 y^{(i)}}{\partial \xi^{(j)} \partial \xi^{(r)}} M\{\Delta \xi^{(j)} \Delta \xi^{(r)}\} + \dots + R(F^{(m)}) \right\} dt$$

Члены вида $E \left\{ (\Delta \xi^{(1)})^{n_1} \times \dots \times (\Delta \xi^{(L)})^{n_L} \right\}$, где $n_r, r = \overline{1, L}$ – некоторые степени, являются центральными моментами соответствующего порядка и легко считаются, поскольку известна функция. Однако, если случайная величина $\Delta \xi^{(i)}$ при каждом значении других случайных величин $\Delta \xi^{(j)}, j = 1, \dots, i-1, i+1, \dots, L$, имеет симметричное распределение, то член $E \left\{ (\Delta \xi^{(1)})^{n_1} \times \dots \times (\Delta \xi^{(L)})^{n_L} \right\}$ равен нулю, как только $\Delta \xi^{(i)}$ входит в него в нечетной степени. Так, например, если вектор ξ имеет симметричное, относительно своего математического ожидания, распределение (нормальное, равномерное и т.п.), то ненулевыми будут лишь $E \left\{ (\Delta \xi^{(1)})^{n_1} \times \dots \times (\Delta \xi^{(L)})^{n_L} \right\}$, в которых все степени n_r четные.

Если теперь ограничиться конечным числом членов в разложении (24), то мы получим детерминированный функционал $\tilde{Z}(u)$.

Таким образом, можно перейти от стохастической задачи к детерминированной задаче минимизации функционала $\tilde{Z}(u)$ с уравнениями связи вида (21).

Рассмотрим теперь вероятностное ограничение

$$\text{Вер} \left\{ y^{(q)}(t) \leq \alpha \right\} \geq \rho, \quad t \in [t_0, t_k],$$

где α – некоторое действительное число. Все последующие рассуждения могут быть перенесены и на условие общего вида (22).

Рассмотрим выражение $\alpha = y^{(q)}(t, \xi, \hat{u}(t))$, где $\hat{u}(t)$ – некоторое фиксированное управление. Это выражение определяет в пространстве параметров R^L некоторую поверхность $S(\hat{u}(t), t)$.

Теперь мы можем сопоставить вероятностному условию $\text{Вер} \left\{ \varphi_j(y(t)) \leq \alpha_j \right\} \geq \rho, j = \overline{1, n}, t \in [t_0, t_k]$, эквивалентное, детерминированное условие

$$\int_{\Xi(\hat{u}, t)} P(\xi) d\xi \geq \rho,$$

где область интегрирования $\Xi(\hat{u}, t)$ определяется поверхностью $S(\hat{u}, t)$ и множеством, где плотность распределения $P(\xi)$ принимает ненулевые значения (в практических задачах это множество, как правило, компактно).

Введем множество Λ функций $A(t), t \in [t_0, t_k]$ таких, что при управлении $u(t)$, решающем задачу оптимизации:

$$\dot{y} = f(y, u, \xi_0), \quad \tilde{Z}(u^*) = \min_{u \in U} \tilde{Z}(u) = m(A),$$

$$\varphi_j(t, \xi_0) \leq A_j(t), \quad j = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_k],$$

выполняется условие

$$\text{Вер} \{ \varphi_j (y(t)) \leq \alpha_j \} \geq \rho, \quad j = \overline{1, n}, \quad t \in [t_0, t_k].$$

Назовем A -задачей оптимизации следующую задачу: найти вектор-функцию $A^*(t) = \{A_j^*(t)\}, j = \overline{1, n}, A^*(t) \in \Lambda$ такое, что

$$m(A^*) = \min_{A \in \Lambda} m(A).$$

Для нахождения вектора $A^*(t)$ нужно построить минимизирующую последовательность A -задачи оптимизации

$$\{A_S\} \in \Lambda: m(A_S) \rightarrow m(A^*).$$

Алгоритм ее построения можно найти в работе [14].

3.4 Оптимизация альтернативных вариантов комплексов “процесс – система управления” по показателям энерго- и ресурсосбережения (блок № 25, рис. 1)

На этом этапе интегрированного проектирования осуществляется решение одно- или двухэтапной задачи оптимизации альтернативных комплексов “процесс – система управления” (допустимых вариантов) при наличии неопределенности. При этом уместно констатировать, что множество допустимых вариантов альтернативных комплексов, подвергаемых оптимизации, как правило, не превышает 5...10 [4, 5], поскольку множество вариантов было отсеяно в соответствии со стратегией интегрированного проектирования автоматизированного химического процесса (рис. 1).

Применяемые нами постановки и алгоритмы решения одно- и двухэтапных задач оптимизации с “мягкими” и “жесткими” ограничениями описаны в работах [5 – 11].

После решения задачи оптимизации допустимых комплексов при наличии неопределенности осуществляется их попарное сравнение по векторному критерию методом имитационного моделирования. Имитационная модель условно представлена на рис. 2.

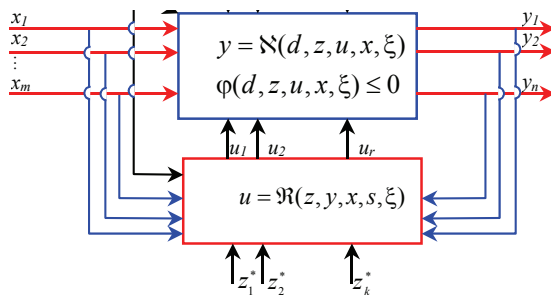


Рис. 2 Имитационная модель автоматизированной химической установки в виде структурной схемы:

x, y – вектор входных и выходных переменных процесса diaзотирования;

d, z – векторы конструктивных и режимных переменных ХТП;

ξ – вектор возмущающих воздействий; z^*, s – векторы оптимальных заданий и настроечных параметров системы управления)

В ходе имитационных исследований помимо вычисления оценок показателей энерго- и ресурсосбережения, экономической целесообразности также определяется техническое задание на точность и быстродействие информационно-измерительной подсистемы, алгоритмов оптимального управления, исполнительных механизмов и устройств управления, на разработку подсистемы адаптации модели и алгоритмов управления.

По результатам имитационных исследований проверяется достижимость поставленных целей функционирования химического процесса и осуществимость требований технического задания. В том случае, если эти требования не достижимы, осуществляется переход к новым обликам аппаратурного оформления или выбору новой структуры химического процесса.

Во второй части настоящей статьи будет приведен пример интегрированного проектирования нелинейных реакторных систем тонкого органического синтеза и систем автоматического управления их режимами.

Заключение

На основе системного анализа современного состояния технологии, аппаратурного оформления и автоматизации многоассортиментных химических производств сформулировано направление работы по разработке стратегии, методов и алгоритмов интегрированного проектирования гибких автоматизированных ХТП при наличии неопределенности исходных данных для проектирования. Сформулированы одно- и двухэтапные задачи стохастической оптимизации конструктивных и режимных переменных ХТП и аппаратов. Рассмотрены методы и алгоритмы, позволяющие за приемлемое время получать решение задачи интегрированного проектирования промышленных ХТП и систем автоматического управления в условиях неопределенности физико-химической, технологической и экономической информации. Даны рекомендации по выбору быстродействующих алгоритмов оптимального управления (на базе метода АКОР) непрерывными и полунепрерывными ХТП.

Список литературы

1. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – Л.: Химия, 1971. – 496 с.
2. Девятков Б.Н. Теория переходных процессов в технологических аппаратах с точки зрения задач управления. – Новосибирск: Редакционно-издательский отдел сибирского отделения АН СССР, 1964. – 324 с.
3. Анисимов И.В., Бодров В.И., Покровский В.Б. Математическое моделирование и оптимизация ректификационных установок. – М.: Химия, 1975. – 215 с.
4. Дворецкий С.И., Марин А.В., Полежаев А.Н. Автоматизированное проектирование оптимальных систем управления химико-технологическими объектами // Автоматизация и роботизация в химической промышленности: Тез. докл. Всесоюз. конф. – Тамбов, 1986. – С. 186 – 189.
5. Бодров В.И., Дворецкий С.И. Стратегия синтеза гибких автоматизированных ХТС // ТОХТ. – 1991. – Т. 25, № 5. – С. 716 – 730.
6. Островский Г.М., Волин Ю.М. О новых проблемах гибкости и оптимизации химико-технологических процессов при наличии неопределенности // ТОХТ. – 1999. – Т. 33, № 5. – С. 578 – 590.
7. Бодров В. И., Дворецкий С. И., Дворецкий Д.С. Оптимальное проектирование энерго- и ресурсосберегающих процессов и аппаратов химической технологии // ТОХТ. – 1997. – Т. 31, № 5. – С. 542 – 548.

8. Волин Ю.М., Островский Г.М. Оптимизация технологических процессов в условиях частичной неопределенности исходной информации // *АиТ*. – 1995. – № 2. – С. 85 – 98.
9. Haleman K. R., Grossmann I. E. Optimal process design under uncertainty // *AIChE Journal*, No. 3 (1983). – Pp. 425 – 433.
10. Островский Г.М., Волин Ю.М., Барит Е.И., Сенявин М.М. Оптимизация химико-технологических процессов в условиях неопределенности // *ТОХТ*. – 1993. – Т. 27, № 2. – С. 183 – 191.
11. Островский Г.М., Волин Ю.М., Головашкин Д.В. Новые подходы к исследованию гибкости и оптимизации химико-технологических процессов в условиях неопределенности // *ТОХТ*. – 1997. – Т. 31, № 2. – С. 202-207.
12. Справочник по теории автоматического управления под. ред. Красовского А.А. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
13. Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. – М.: Наука, 1977. – 272 с.
14. Солопахо А.В. Гарантированное оптимальное управление объектом, описанным системой дифференциальных уравнений со случайным параметром // *Вестник ТГТУ*. – 1995. – Т.1, № 3 – 4. – С. 239 – 246.
15. Дворецкий С.И., Майстренко А.В., Утробин Н.П., Дворецкий Д.С. Разработка непрерывной энерго- и ресурсосберегающей технологии получения азопигментов // *Вестник Тамбовского государственного университета*. – 1997. – Т. 2, № 1. – С. 76 – 82.
16. Хайпер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Мир, 1987. – 412 с.

Setting of Tasks and Problem of Integrated Design of Automated Chemical Technological Processes under Uncertainty. Part 1

D.S. Dvoretzky, S.I. Dvoretzky

Department “Technological Equipment and Advanced Technologies”, TSTU

Key words and phrases: integrated design; flexibility of chemical technological processes (ChTP); uncertainties; stochastic optimization; one- and two-step tasks; “rigid” and “soft” limitations; control system; optimum control; modes stabilization; continuous and periodical ChTP.

Abstract: The general task of integrated (assembled) design of energy- and resource-saving ChTP and their modes control systems when having uncertainties of physical mathematical, technological and economical initial data for designing is formulated. Multi-stage strategy (methodology) of integrated designing is developed. Depending on changes in the uncertainties on the stages of designing and application of ChTP one- and two-step tasks of stochastic optimization with “rigid” and “soft” (probable) limitations are formulated. Methods and algorithms of solving one- and two-step tasks of stochastic optimization as well as tasks of optimum control for continuous and periodical ChTP occurring at integrated designing are considered.

**Aufgabenstellung und Probleme der integrierten Projektierung
von biegsamen automatisierten chemisch-technologischen Prozessen.
Teil 1**

Zusammenfassung: Es ist die allgemeine Aufgabe der integrierten (gemeinsamen) Projektierung der energie- und ressourcensparenden chemisch-technologischen Prozesse (ChTP) und der Steuersysteme ihres Regimes bei Vorhandensein von der Unbestimmtheit der physikalisch-chemischen, technologischen und ökonomischen Ausgangsdaten für die Projektierung formuliert. Es ist die Viletappenstrategie (Methodologie) der integrierten Projektierung entwickelt. Je nach der Veränderung der Unbestimmtheit auf den Etappen der Projektierung und der Ausbeutung von ChTP werden Ein- und Zweietappenaufgabe der stochastischen Optimierung mit den "harten" und "weichen" Beschränkungen formuliert. Es werden die Methoden und die Algorithmen der Lösung von Ein- und Zweietappenaufgaben der stochastischen Optimierung und auch der Aufgaben der Optimalsteuerung mit den stetigen und periodischen bei der integrierten entstehenden Projektierung ChTP betrachtet.

**Les questions posées et les problèmes de la conception intégrée
des processus technologiques et chimiques flexibles avec
la présence de l'indétermination.
1-ère partie**

Résumé: Est formulé le problème général de la conception intégrée des processus technologiques et chimiques conservant de l'énergie et des ressources ainsi que des systèmes de la commande de leurs régimes avec la présence de l'indétermination des données initiales économiques, physiques et chimiques pour la conception. Est élaborée la stratégie de la conception intégrée qui comprend plusieurs étapes. En fonction du changement de l'indétermination aux étapes de la conception et de l'exploitation des processus technologiques et chimiques sont formulés des problèmes de l'optimisation stochastique à une et à deux étapes avec des limitations "fixes" et "souples". Sont examinées les méthodes et les algorithmes de la solution des problèmes de l'optimisation stochastique à une et à deux étapes, ainsi que des problèmes de l'optimisation de la commande des processus technologiques et chimiques constants et périodiques qui apparaissent au cours de la conception intégrée.
