

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК (МАТЕМАТИКА, ХИМИЯ, ФИЗИКА)

УДК 66.011.001.57:677.842.41

*Д.С. Дворецкий, А.В. Майстренко, И.Л. Вольщак, О.И. Ерохин*¹ ЗАДАЧИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ИНТЕГРИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИБКИХ ХТС

Целью интегрированного проектирования химических, пищевых и смежных с ними производств является выбор аппаратурно-технологического оформления и систем автоматического управления, обеспечивающих устойчивый и безопасный выпуск качественной и конкурентоспособной продукции [1]. При этом следует добиваться выполнения заданных регламентом производства технологических условий осуществления процессов, норм экологической безопасности и безопасности жизнедеятельности, которые фигурируют в задачах стохастической оптимизации при аппаратурно-технологическом оформлении производства в форме ограничений.

Ограничения могут задаваться в "жесткой", "мягкой" и/или смешанной формах. В "жесткие" ограничения включают, как правило, требования технологического регламента, относящиеся к взрыво- и пожаробезопасности производства, экологической безопасности, качеству выпускаемой продукции и т.п. При проектировании и эксплуатации производства "жесткие" ограничения должны выполняться безусловно. В "мягкие" ограничения следует включать требования технологического регламента, которые могут выполняться "в среднем" или с заданной, но достаточной высокой вероятностью, например такие, как ограничения на производительность, некоторые технологические переменные и технико-экономические показатели производства, качественные показатели выпускаемой продукции.

Проблема выполнения тех или иных ограничений сильно осложняется наличием неопределенности исходной информации, с которой всегда сталкиваются проектировщики, а именно: неточностью физических и химических закономерностей, лежащих в основе математического описания статики и динамики объектов управления (технологических процессов и аппаратов производства), случайными изменениями (дрейфом) физико-химических характеристик перерабатываемых материалов и технологических переменных (температуры, скорости и состава потоков сырья и др.).

Достижение цели интегрированного проектирования возможно только при создании работоспособных (гибких) ХТС. Под гибкостью ХТС здесь понимается ее способность к сохранению своего функционального назначения независимо от случайного изменения внутренних и внешних неопределенных параметров и переменных ХТС в заданной области.

Выделим два этапа "жизни" ХТС – этапы проектирования и эксплуатации. На этапе эксплуатации гибкой ХТС условия осуществления технологических процессов, задаваемые технологическим регламентом, должны выполняться за счет соответствующего выбора управляющих воздействий, реализуемых в системе автоматического управления, и этот факт следует учитывать в постановке задач стохастической оптимизации при выборе аппаратурно-технологического оформления ХТС.

Отметим ключевые факторы, влияющие на формирование гибкости и постановку задач оптимизации в условиях неопределенности.

1. *Уровень неопределенности на этапе проектирования.* Возможны следующие варианты: а) о неопределенных параметрах ξ известно только то, что они принадлежат некоторой области Ξ ; б) известны функции распределения вероятностей неопределенных параметров ξ .

2. *Уровень неопределенности ξ на этапе эксплуатации.* Постановка задач оптимизации зависит от возможностей информационно-измерительной системы, ответственной за контроль и сбор информации о состоянии объекта управления. Неопределенные переменные (параметры) ξ на этапе проектирования здесь (на этапе эксплуатации) могут быть разбиты на две группы. К первой группе относятся переменные ξ^1 , значения которых могут быть измерены с заданной точностью, ко второй – переменные ξ^2 , значения которых могут быть уточнены (область неопределенности Ξ при этом сужается).

3. *Способы обеспечения гибкости ХТС:* а) имеются конструктивные d и управляющие переменные z ; б) имеются только управляющие переменные z .

В зависимости от уровня неопределенности ξ на этапе эксплуатации ХТС и вида ограничений могут быть сформулированы следующие задачи стохастической оптимизации (см. табл.): одноэтапные задачи оптимизации (ОЭЗО) с "мягкими" (вероятностными) [2, 3] и "жесткими" ограничениями [4, 5]; двухэтапные задачи оптимизации с "мягкими" (вероятностными) [6], "жесткими" [7 – 9] и смешанными ограничениями (ДЭЗО) [10, 11].

¹ Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. ТГТУ С.И. Дворецкого.

**Постановки задач стохастической оптимизации
при аппаратурно-технологическом оформлении ХТС**

Тип ограничений	Одноэтапная задача оптимизации (ОЭЗО)	Двухэтапная задача оптимизации (ДЭЗО)
"Мягкие" (вероятностные)	$\min_{a,d,z} E_{\xi} \{I(a, d, z, \xi)\},$ $\Pr\{g_j(a, d, z, \xi) \leq 0\} =$ $= \int_{\Omega_j} P(\xi) d\xi \geq \rho_j,$ $j=1, \dots, m$ $\Omega_j = \{\xi : g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, \xi \in \Xi\}$	$\min_{a,d} E_{\xi} \{I^*(a, d, \xi)\} =$ $= \min_{a,d} \left\{ \int_{\Xi} \left(\min_z \{I(a, d, z, \xi) \mid g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, j \in J\} \right) P(\xi) d\xi + \right.$ $\left. + \int_{\Xi \setminus \Omega} \left(\min_z \{\bar{K}(a, d, z, \xi) \mid g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, j \in J'\} \right) P(\xi) d\xi \right\},$ $\Pr[\xi \in \Xi] \geq \rho, \quad \Omega(a, d) = \left\{ \xi : \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, \xi \in \Xi \right\},$ <p>где $\bar{K}(a, d, z, \xi) = I(a, d, z, \xi) + A \cdot \max \left(\max_{j \in J'} g_j(a, d, z, \xi), 0 \right)^2$</p>

Тип ограниченный	Одноэтапная задача оптимизации (ОЭЗО)	Двухэтапная задача оптимизации (ДЭЗО)
"Жесткие"	$\min_{a,d,z} E_{\xi} \{I(a, d, z, \xi)\},$ $\max_{\xi \in \Xi} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0,$ $j=1, \dots, m$	$\min_{a,d} E_{\xi} \{I^*(a, d, \xi)\} =$ $= \min_{a,d} \int_{\Xi} \min_z \{I(a, d, z, \xi) \mid g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, j \in J\} P(\xi) d\xi,$ $F_1(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0$
Смешанные	–	$\min_{a,d} F(a, d) = F_1(a, d) + F_2(a, d),$ $\Pr[\xi \in \Omega_1] \geq \rho, \quad \chi_1(a, d; J_1) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J_1} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0,$ <p>где $j \in J_1 = \{1, \dots, m_1\}$ – "жесткие", а $j \in J_2 = \{m_1 + 1, \dots, m\}$ – "мягкие" ограничения</p>

Здесь $I(\bullet)$ – некоторая целевая функция; $E\{\bullet\}$ – математическое ожидание; a – вариант аппаратного оформления процесса; $g_j(\bullet)$ – функция j -го ограничения; $P(\xi)$ – функция плотности вероятности; ρ_j – заданные значения вероятности выполнения ограничений.

Основная трудность решения ОЭЗО состоит в необходимости вычисления многомерных интегралов $E_{\xi} \{I(a, d, z, \xi)\}$ и $\int_{\Omega_j} P(\xi) d\xi \geq \rho_j$. В работах [11, 14] предлагается другая формулировка ОЭЗО, в которой в качестве критерия будет использоваться его верхняя граница, которая не может быть нарушена с заданной вероятностью:

$$\min_{a,d,z,\alpha} \alpha$$

$$\Pr\{I(a, d, z, \xi) - \alpha \leq 0\} \geq \rho_0,$$

$$\Pr\{g_j(a, d, z, \xi) \leq 0\} \geq \rho_j, j=1, \dots, m$$

или

$$\min_{a,d,z,\alpha} \alpha$$

$$\Pr\{I(a, d, z, \xi) - \alpha \leq 0\} \geq \rho_0,$$

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(a, d, z, \xi) \leq 0, j=1, \dots, m.$$

Методы и алгоритмы решения ОЭЗО с конкретными примерами приведены в работах [2, 5, 10, 11]. Решение одноэтапной задачи $[a^*, d^*, z^*]$ позволяет найти конструкцию a^* , d^* и режимы функционирования z^* , которые гарантируют, что в процессе эксплуатации ХТС целевая функция $I^*(a^*, d^*, z^*, \xi)$ будет меньше чем α^* с заданной вероятностью ρ_0 . Чтобы реализовать это решение, мы должны поддерживать выполнение условий $z = z^*$ и на этапе эксплуатации ХТС. Ясно, что использование одноэтапной задачи на стадии проектирования приводит к не вполне экономичным конструкциям аппаратов ХТС, так как не предполагается уточнение значений управляющих переменных ХТС на этапе ее эксплуатации.

Принципиальная разница между ДЭЗО и ОЭЗО заключается в том, что все формулировки ДЭЗО в условиях неопределенности будут учитывать возможность изменения управляющих воздействий на этапе эксплуатации ХТС. Особенности ДЭЗО, методы и алгоритмы их решения с конкретными примерами приведены в многочисленных работах Г.М. Островского и др. [10 – 17]. Таким образом, оптимизационная задача может быть сформулирована с учетом различных уровней неопределенности информации о ХТС, доступной на этапе ее эксплуатации. При этом следует учитывать, что уточнение информации связано с определенными затратами,

которые необходимо учитывать при проектировании ХТС. Разработка более точных математических моделей, информационно-измерительных систем и систем автоматического управления (стабилизации) приводит к повышению уровня доступной информации о состоянии ХТС и снижению уровня неопределенности, что позволяет уменьшить коэффициенты запаса технического ресурса ХТС и повысить эффективность ее функционирования на этапе эксплуатации. Для ответа на вопрос, какую систему автоматического управления целесообразно применять для управления режимами функционирования ХТС, нужно решить две задачи: с первоначальным уровнем неопределенности (оптимальное значение целевой функции – I_1^*) и с пониженным уровнем неопределенности (I_2^*). Разность $I_1^* - I_2^*$ (для случая минимизации критерия) определяет выигрыш от установки информационно-измерительной системы и, соответственно, от понижения уровня неопределенности на этапе эксплуатации ХТС. Если эта разность превышает стоимость системы автоматического управления (стабилизации), то разработка последней целесообразна. В работах [1, 3] формулируется общая оптимизационная задача, включающая совместное проектирование объекта и экономически целесообразной системы автоматического управления, а также приводятся новые подходы к ее решению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворецкий, Д.С. Интегрированное проектирование энерго- и ресурсосберегающих химико-технологических процессов и систем управления: стратегия, методы и применение / Д.С. Дворецкий, С.И. Дворецкий, Г.М. Островский // Теоретические основы химической технологии. – 2008. – Т. 42, № 1. – С. 29 – 39.
2. Бодров, В.И. Оптимальное проектирование энерго- и ресурсосберегающих процессов и аппаратов химической технологии / В.И. Бодров, С.И. Дворецкий, Д.С. Дворецкий // Теоретические основы химической технологии. – 1997. – Т. 31, № 5. – С. 542 – 548.
3. Bernardo, F.P. Robust optimization framework for process parameter and tolerance design / F.P. Bernardo, P.M. Saraiva // A.I.Ch.E. Journal. – 1998. – V. 4, N 9. – P. 2007 – 2017.
4. Островский, Г.М. Оптимизация химико-технологических процессов в условиях неопределенности / Г.М. Островский, Ю.М. Волин, Е.И. Барит и др. // Теоретические основы химической технологии. – 1993. – Т. 27, № 2. – С. 183 – 191.
5. Островский, Г.М. О новых проблемах в теории гибкости и оптимизации химико-технологических процессов при наличии неопределенности / Г.М. Островский, Ю.М. Волин // Теоретические основы химической технологии. – 1999. – Т. 33, № 5. – С. 578 – 590.
6. Островский, Г.М. Оптимизация химико-технологических процессов в условиях неопределенности при наличии жестких и мягких ограничений / Г.М. Островский, Ю.М. Волин // Доклады Академии наук. – 2001. – Т. 376, № 2. – С. 215 – 218.
7. Halemane, K.P. Optimal Process Design under Uncertainty / K.P. Halemane, I.E. Grossmann // A.I.Ch.E. Journal. – 1983. – V. 29, N 3. – P. 425 – 433.
8. Shapiro, A. A simulation-based Approach to Two-step Stochastic Programming with Resource / A. Shapiro, T.H. De-Mello // Math. Progr. Ser. A. – 1998. – V. 81. – P. 301 – 305.
9. Островский, Г.М. Алгоритм гибкости и оптимизация химико-технологических систем в условиях неопределенности исходной информации / Г.М. Островский, Ю.М. Волин // Доклады РАН. – 1994. – Т. 339, № 6. – С. 782 – 784.
10. Островский, Г.М. Оптимизация в химической технологии / Г.М. Островский, Ю.М. Волин, Н.Н. Зиядинов. – Казань : ФЭН Академии наук РТ, 2005. – 394 с.
11. Островский, Г.М. Технические системы в условиях неопределенности / Г.М. Островский, Ю.М. Волин. – М. : Бином, Лаборатория знаний, 2008. – 319 с.
12. Дворецкий, С.И. Двухэтапный алгоритм стохастической оптимизации для расчета процессов тонкого органического синтеза / С.И. Дворецкий, Д.С. Дворецкий и др. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21 : сб. тр. XXI Междунар. науч. конф. – Саратов, 2008. – Т. 2. – С. 8 – 10.
13. Дворецкий, С.И. Новый подход к оптимизации проектируемого автоматизированного химико-технологического процесса / С.И. Дворецкий, Д.С. Дворецкий и др. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22 : сб. тр. XXII Междунар. науч. конф. – Псков : Изд-во Псков. гос. политехн. ин-та, 2009. – Т. 10. – С. 43 – 45.
14. Островский, Г.М. Новые подходы к исследованию гибкости и оптимизации химико-технологических процессов в условиях неопределенности / Г.М. Островский, Ю.М. Волин, Д.В. Головашин // Теоретические основы химической технологии. – 1997. – Т. 31, № 2. – С. 202 – 207.
15. Волин, Ю.М. Оптимизация технологических процессов в условиях частичной неопределенности исходной информации / Ю.М. Волин, Г.М. Островский // Автоматика и телемеханика. – 1995. – № 2. – С. 85 – 98.
16. Островский, Г.М. Многокритериальная оптимизация химико-технологических процессов в условиях неопределенности / Г.М. Островский, Ю.М. Волин // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 400, № 2. – С. 210 – 213.
17. Волин, Ю.М. Многокритериальная оптимизация технических систем в условиях неопределенности / Ю.М. Волин, Г.М. Островский // Автоматика и телемеханика. – 2007. – № 3. – С. 165 – 180.