

УДК 544.723.23, 519.633.2
DOI: 10.17277/vestnik.2024.02.pp.184-195

ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ
ПРИ ИНТЕГРИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, АППАРАТОВ И СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

С. И. Дворецкий, Д. С. Дворецкий, Е. И. Акулинин✉

*Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»,
bio-topt@yandex.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: гибкие технологические системы; интегрированное проектирование; конструктивные параметры; критерий оптимальности; методология; неопределенность в исходной информации; одно- и двухэтапные задачи оптимизации; оптимальные задания регуляторам; режимные переменные состояния; система автоматического управления; функции-ограничения.

Аннотация: Предпринята попытка разработки методологии интегрированного проектирования работоспособных (гибких) технологических процессов, аппаратов и систем (био- и химико-технологических) и формализации возможных подходов к решению задач оптимизации конструктивных параметров и режимных переменных (оптимальных заданий регуляторам системы автоматического управления) на отдельных стадиях многоэтапной итерационной процедуры решения задачи интегрированного проектирования технологических систем в условиях неопределенности. Постановки одно- и двухэтапных задач оптимизации при интегрированном проектировании учитывают наличие интервальной неопределенности факторов, что при условии их решения позволяет надеяться на достижение безопасного и оптимального (в смысле минимума приведенных затрат, себестоимости выпускаемой продукции и других показателей эффективности производства) функционирования технологических процессов, аппаратов и систем независимо от наличия неопределенных факторов в исходной информации.

Обозначения

A – множество типов аппаратурно-технологического оформления стадий производства, шт.;	$M[\cdot]$ – математическое ожидание величины $[\cdot]$;
B – множество классов систем автоматического управления, шт.;	$P_{\text{дов}}$ – заданное (доверительное) значение вероятности выполнения ограничения;
D – множество конструктивных параметров технологической системы;	$P_{\text{г}}$ – вероятность выполнения ограничения $\{\cdot\}$;
H – множество структур системы автоматической стабилизации режимных переменных технологической системы;	R – множество альтернативных технологий (методов) производства, шт.;
I – множество индексов аппроксимационных точек;	S – множество настроечных параметров системы автоматической стабилизации (САС);
J – множество индексов функций-ограничений;	U – множество режимных переменных (оптимальных заданий регуляторам САС) состояния системы;

Y – множество выходных переменных состояния системы;	y – вектор выходных переменных состояния технологической системы;
a – тип аппаратурно-технологического оформления стадии производства, ед.;	α – верхняя граница целевой функции (критерия оптимальности);
b – класс систем автоматического управления;	v – номер итерации;
d – вектор конструктивных параметров технологической системы;	Ξ – множество неопределенных параметров;
$g(\cdot)$ – вектор функций-ограничений;	ξ – вектор неопределенных параметров;
h – структура системы автоматической стабилизации режимных переменных технологической системы;	$\varphi(\cdot)$ – показатель эффективности (целевая функция, критерий оптимальности) функционирования технологической системы;
r – технология (метод) производства;	χ – функция гибкости технологической системы;
s – вектор настроечных параметров САС;	Ω – множество ассортиментов производимой продукции, шт.;
u – вектор режимных переменных (заданий регуляторам САС);	ω – ассортимент производимой продукции.

Введение

Стремительное развитие вычислительной техники и информационных технологий в последней четверти XX и начале XXI века стало стимулом развития и применения математических методов в технике и технологиях, привело к необходимости выработки методологии математического моделирования сложных био- и химико-технологических систем (**БТС** и **ХТС**) и ознаменовалось массовым созданием пакетов моделирующих программ, предназначенных для анализа (исследования) эффективности их функционирования, оптимизации и интегрированного проектирования. Проектно-конструкторские решения при интегрированном проектировании БТС и ХТС принимаются в условиях неопределенности исходной информации (исходных данных для проектирования). Системный анализ процессов и аппаратов био- и химической технологий, компьютерное моделирование и цифровизация промышленных технологий, теория оптимизации и принятие решений в условиях неопределенности исходной информации становятся фундаментальными составляющими комплексного подхода к решению сложных задач синтеза (интегрированного проектирования) и исследования БТС и ХТС; становится востребованной разработка новой методологии – учения об организации деятельности при интегрированном проектировании работоспособных (гибких) энерго- и ресурсосберегающих био- и химико-технологических процессов, аппаратов и систем в условиях неопределенности исходной информации [1 – 7].

Можно назвать несколько причин наличия неопределенности в исходной информации при постановке и решении задач оптимизации при интегрированном проектировании БТС и ХТС. *Первая* – неполнота, недостаточность знаний об окружающем мире и объекте проектирования (то есть неосведомленность относительно характеристик системы и окружающей среды, с которой система взаимодействует). Чем меньше мы обладаем знаниями в данной области, где следует принять решение, тем больше имеется неопределенности при принятии (выборе) решений. *Вторая* – случайность (случайностью называют то, что в сходных (похожих) условиях происходит неодинаково, причем заранее нельзя предсказать, что и как будет на этот раз). *Третья* – противодействие, специалисты полагают, что неопределенность, неясность поведения среды, при взаимодействии с которой происходит функционирование БТС и ХТС, появляется не сама по себе (то есть естественным путем), а насаждается искусственно (во вред нам).

Проблема выбора решения в условиях неопределенности состоит в следующем. При интегрированном проектировании БТС или ХТС происходит определение оптимальной с точки зрения какого-либо показателя эффективности (критерия оптимальности) φ «конструкции» производства (технологии, структуры технологической схемы и ее аппаратурно-технологического оформления, режи-

мов функционирования технологического оборудования в составе технологической схемы, системы автоматического управления режимами ее функционирования и т.д.). Обычно φ – экономический критерий – прибыль от эксплуатации производства, себестоимость продукции, приведенные затраты на осуществление производства и др.; при этом оптимальная «конструкция» производства должна гарантировать выполнение проектных требований (ограничений), связанных с производством заданного ассортимента продукции надлежащего качества; обеспечением выполнения технико-экономических показателей функционирования производства (задаваемых в техническом задании на проектирование и технологическом регламенте производства); безопасностью эксплуатации и экологической безопасностью производства.

В реальных условиях φ обычно зависит от конструктивных параметров $d \in D$ (технологии (метода) производства, структуры технологической схемы, типов и геометрических размеров технологического оборудования производства и т.д.), режимных переменных $u \in U$ функционирования процессов и аппаратов производства и неопределенных факторов $\xi \in \Xi$, то есть $\varphi \equiv \varphi(d, u, \xi)$. Понятно, что показатель эффективности функционирования производства φ зависит от ξ , то есть $\varphi \equiv \varphi(\dots, \xi)$, и не может быть вычислен (φ является неопределенным), а сама задача поиска оптимального решения теряет определенность. Присутствие неопределенных факторов ξ придает задаче оптимизации новое качество: она становится задачей о выборе решения (наилучшей альтернативы) в условиях неопределенности.

Удовлетворение проектных ограничений усложняется и наличием некоторой неопределенности (неточности) параметров в математических моделях процессов и аппаратов производства (стехиометрических уравнениях и уравнениях кинетики биохимических реакций, материального и теплового балансов БТС и ХТС и др.), используемых в технологических расчетах процессов и аппаратов при интегрированном проектировании производства.

При наличии случайных и неопределенных факторов задачи принятия решений при интегрированном проектировании технологических систем делят на два больших класса:

- стохастические задачи принятия решений или принятие решений при риске (принятое решение приводит к одному из множества возможных исходов, вероятности появления которых для лица, принимающего решения (ЛПР), известны);
- принятие решений в условиях неопределенности (принятое решение может привести к одному из множества возможных исходов, вероятности появления которых для ЛПР неизвестны).

На практике учет случайных факторов, заданных распределением вероятности, выполняют двумя способами:

- 1) заменой случайных параметров их математическими ожиданиями;
- 2) «взвешиванием» показателя качества по вероятности (данный способ иногда называют «оптимизация в среднем»).

В задачах оптимизации при интегрированном проектировании БТС и ХТС показатель эффективности φ обычно зависит от четырех групп факторов (d, u, y, ξ) , то есть $\varphi \equiv \varphi(d, u, y, \xi)$, где $d \in D$ – вектор искомых при проектировании конструктивных параметров БТС или ХТС (технология (метод) производства, структура технологической схемы, типы и геометрические размеры технологических аппаратов и технических устройств, обеспечивающих оптимальные условия осуществления технологических процессов и операций); $u \in U$ – вектор режимных переменных (оптимальных заданий регуляторам системы автоматического управления) производства, реализуемых в технологических аппаратах БТС или ХТС.

Понятно, что создание новых энерго- и ресурсосберегающих технологий и производств становится бесперспективным без учета неопределенности исходной информации [8, 9]. Все это способствовало возникновению и становлению

теории гибкости технологических систем – теории создания (синтеза) работоспособных БТС и ХТС, функционирующих в соответствии с технологическим регламентом производства независимо от того, какие значения принимают неопределенные факторы из заданной области неопределенности Ξ на стадии проектирования БТС или ХТС. Существенное развитие данная теория получила в работах профессора Гроссмана И. Е. [Grossmann I. E.] и его сотрудников в университете имени Карнеги–Меллона (Питсбург, США) [1 – 4]. Согласно разработанной ими теории, при синтезе (интегрированном проектировании) технологических систем могут быть определены такие конструкции аппаратов, технологические схемы установок (структуры соединения аппаратов), режимы их функционирования и системы автоматического управления ими, при которых создаваемые технологические системы точно или с заданной вероятностью будут удовлетворять требованиям технического задания на проектирование производства. Условие работоспособности БТС и ХТС профессором Гроссманом И. Е. формализовано в виде функции гибкости, неположительное значение которой гарантирует работоспособность проектируемого технологического объекта в изменяющихся условиях эксплуатации вследствие частичной неопределенности исходных данных для проектирования [10].

Обычно неполнота знаний о проектируемой системе (БТС, ХТС) и окружающей среде, в которой ей предстоит функционировать, сводится к тому, что некоторые параметры в математических моделях при интегрированном проектировании производства мы знаем недостоверно (неточно); о них только известно, что они принадлежат некоторой области неопределенности Ξ . При этом различают внутренние и внешние неопределенные параметры: внутренние – характеризуют переменные состояния технологической системы (БТС, ХТС) – это могут быть константы скоростей биохимической реакции, коэффициенты процессов массо- и теплообмена, диффузии веществ и т.д; внешние – переменные состояния внешней среды по отношению к системе (БТС, ХТС) – переменные состояния входных и выходных потоков системы (температура, объемная скорость, концентрации веществ).

Следует выделить и другой случай, когда неизвестные (неопределенные) факторы ξ не являются случайными величинами (случайными функциями); в этом случае не имеет смысла говорить об их «законах распределения» или других вероятностных характеристиках. Здесь разумно выбрать некоторое компромиссное решение, приемлемое для всего диапазона Ξ возможного изменения неопределенных факторов ξ .

Цель работы – формализация постановок задач оптимизации при проектировании оптимальной «конструкции» БТС или ХТС (технологии, структуры технологической схемы и ее аппаратурно-технологического оформления, режимов функционирования технологических аппаратов и их реализация с помощью автоматических систем управления и т.д.) такой, что ее эксплуатация будет осуществляться строго в соответствии с технологическим регламентом производства независимо от изменения внутренних и внешних неопределенных факторов в заданной (допустимой) области их возможного варьирования.

Методология интегрированного проектирования

Анализ процесса интегрированного проектирования сложных технологических систем (БТС, ХТС) позволяет представить весь комплекс работ в виде последовательной схемы получения решений, включающей определение экономически целесообразных структур (технологий) R производства, класса B и структур H систем автоматического управления технологическим оборудованием производства, оптимальных конструктивных D , режимных U переменных аппаратурно-технологического оформления БТС или ХТС и настроечных параметров системы автоматического управления (САУ) исходя из целей проектируемого производства [9].

Решение задачи интегрированного проектирования оптимального автоматизированного комплекса «Технологическая система (БТС, ХТС) – САУ» невозможно простым перебором альтернативных структур (технологий) $r \in R$ получения заданного ассортимента биохимических продуктов $\omega \in \Omega$, типов $a \in A$ аппаратно-технологического оформления стадий производства, классов $b \in B$ и структур $h \in H$ САУ, векторов конструктивных $d \in D$, режимных $u \in U$ переменных технологической системы и настроечных параметров $s \in S$ САУ из-за высокой размерности задачи, нелинейности и нестационарности био- и химико-технологических процессов, сложности алгоритмов вычисления целевой функции (критерия оптимальности) интегрированного проектирования производства. Требуется декомпозиция задачи, разработка стратегии применения методов автоматизированного проектирования, поскольку допустимая область проектных параметров $\Omega \times R \times A \times B \times H \times D \times U \times S$ строится в ходе самого процесса проектирования. Этого можно добиться только на основе интегрированного подхода к проектированию производства, его аппаратно-технологического оформления и САУ в рамках единой постановки задачи.

Эффективность функционирования технологической системы (БТС, ХТС) в статических режимах оценивается показателем эффективности φ . При этом в качестве множества вариантов аппаратного оформления технологической системы A задаются альтернативные возможные конструкции машин и аппаратов $a \in A$. В данной статье в качестве класса систем автоматического управления режимами функционирования технологической системы (БТС, ХТС) непрерывного действия будем рассматривать САС режимных переменных.

Выбор структуры САС осуществляется с использованием множеств регулируемых (наблюдаемых) переменных и допустимых управляющих воздействий. При этом выбранные каким-либо образом структуры САС ранжируются по критерию экономической целесообразности с учетом наблюдаемости выходных переменных системы, оценки затрат на разработку необходимых приборов автоматического контроля, возможности и точности прогноза выходных переменных по косвенным показателям, управляемости системы с той или иной комбинацией управляющих воздействий, динамических свойств каналов управления (показателей инерционности и регулируемости объекта управления).

На *первом* шаге методологии интегрированного проектирования осуществляется перевод целей управления технологической системой в совокупность переменных состояния (или их функции) и выбираются наблюдаемые переменные состояния (или их функции), стабилизация (регулирование) которых соответствует поддержанию целевой функции функционирования технологической системы на оптимальном уровне. Если некоторые из них неизмеримы, то осуществляются косвенные измерения и восстановление требуемых переменных состояния по математической модели.

На *втором* шаге проводится исследование выполнения условия структурной наблюдаемости системы с использованием множества наблюдаемых переменных, выбранных на предыдущем шаге: 1) если проектируемая система (БТС, ХТС) структурно управляема, то выбранные наблюдаемые переменные на первом шаге и управляющие (независимые переменные на входе технологической системы) представляют допустимую структуру САС; 2) в случае невыполнения условий структурной наблюдаемости объекта управления, множество наблюдаемых переменных должно пополняться новыми опытными данными.

Полный анализ наблюдаемых переменных состояния технологической системы, управляющих и возмущающих воздействий включает также исследование ее статических и динамических характеристик. При этом определяются диапазон целесообразных изменений и предельные значения управляющих воздействий, чувствительность основных выходных переменных (наблюдаемых переменных состояния системы) по отношению к управляющим воздействиям, показатели инерционности и регулируемости системы по каналам управления.

Таким образом, прямое решение задачи синтеза технологической системы (БТС, ХТС) с заданными или оптимальными статическими и динамическими характеристиками сопряжено с необходимостью решения уравнений статики и линейных уравнений динамики в окрестности оптимального статического режима, вычисление показателей инерционности и регулируемости системы по каналам управления.

Для определения конструктивных и режимных (оптимальных заданий регуляторам САС) переменных при проектировании аппаратно-технологического оформления технологической системы формулируются, как правило, одно- и двухэтапные задачи оптимизации в условиях интервальной неопределенности исходных данных для проектирования.

Постановки одноэтапных задач оптимизации при интегрированном проектировании технологических систем

При постановке одноэтапных задач оптимизации исходят из того факта, что конструктивные и режимные переменные (оптимальные задания регуляторам САС) технологической системы определяются на стадии проектирования и далее не изменяются при эксплуатации производства.

Вначале сформулируем одноэтапные задачи оптимизации с жесткими ограничениями, используя различные критерии оптимальности.

1. Критерий оптимальности $I(d, u) = M_{\xi}[\varphi(d, u, \xi)]$ – среднее значение показателя $\varphi(d, u, \xi)$ эффективности функционирования системы, которое он может принять в процессе эксплуатации производства. Объединяя данную целевую функцию с условием гибкости, получим постановку задачи оптимизации при интегрированном проектировании технологической системы в условиях неопределенности $\xi \in \Xi$:

$$I(d^*, u^*) = \min_{(d, u) \in D \times H} \{I(d, u) = M_{\xi}[\varphi(d, u, \xi)]\}; \quad (1)$$

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(d, u, \xi) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

2. При реализации стратегии наихудшего случая в качестве критерия оптимальности используется величина $\max_{\xi \in \Xi} \varphi(d, u, \xi)$, в этом случае одноэтапная задача оптимизации при проектировании технологической системы при наличии неопределенности имеет вид

$$I(d^*, u^*) = \min_{(d, u) \in D \times H} \left\{ I(d, u) = \max_{\xi \in \Xi} \varphi(d, u, \xi) \right\}; \quad (3)$$

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(d, u, \xi) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (4)$$

Сформулируем одноэтапные задачи оптимизации с мягкими ограничениями. Рассмотрим два случая, в которых будут использоваться вероятностные ограничения. Предположим, что при проектировании технологической системы имеется полная информация относительно функции распределения $P(\xi)$ вероятностей для вектора ξ неопределенных параметров; для этого случая можно сформулировать следующую задачу оптимизации:

$$I(d^*, u^*) = \min_{(d, u) \in D \times H} I(d, u); \quad (5)$$

$$\Pr\{g_j(d, u, \xi) \leq 0\} \geq P_{\text{дов}}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

где $\Pr\{g_i(d, u, \xi) \leq 0\} = \int_{\Omega_j} P(\xi) d\xi$ – вероятность выполнения ограничения

$g_i(d, u, \xi) \leq 0$, $P(\xi)$ – функция плотности вероятности для ξ ;

$$\Omega_j = \{\xi \mid g_i(d, u, \xi) \leq 0, \xi \in \Xi\};$$

левая часть равенства есть вероятность попадания случайной точки ξ в допустимую область Ω_j .

В качестве целевой функции $I(d, u)$ для задачи оптимизации при проектировании технологической системы можем использовать либо среднее значение первоначального показателя $\varphi(d, u, \xi)$ эффективности работы технологической системы при эксплуатации производства, либо наихудшее значение первоначального показателя $\max_{\xi \in \Xi} \varphi(d, u, \xi)$.

Если в задаче оптимизации при проектировании биотехнологической системы используется целевая функция $M_{\xi}[\varphi(d, u, \xi)]$, тогда ищем такую «конструкцию» технологической системы и режим ее функционирования, для которых средняя (по ξ) величина первоначального показателя $\varphi(d, u, \xi)$ эффективности работы технологической системы при эксплуатации производства минимальна. Если в задаче оптимизации при проектировании технологической системы используется целевая функция $\max_{\xi \in \Xi} \varphi(d, u, \xi)$, то при решении задачи оптимизации

находим минимальное (наихудшее по ξ) значение первоначального показателя $\varphi(d, u, \xi)$ эффективности работы технологической системы при эксплуатации производства.

Рассмотрим теперь формулировку, в которой в качестве критерия в задаче оптимизации при проектировании биотехнологической системы будет использоваться верхняя граница первоначального показателя эффективности работы технологической системы при эксплуатации производства с доверительной вероятностью $P_{\text{дов}}$. Как и в предыдущей задаче оптимизации, будем считать, что каждое ограничение задачи должно выполняться с вероятностью не меньшей, чем $P_{\text{дов}}$. В этом случае математическая формулировка задачи с вероятностными ограничениями будет иметь следующий вид:

$$\min_{(d, u) \in D \times H, \alpha} \alpha; \quad (7)$$

$$\Pr\{\varphi(d, u, \xi) - \alpha \leq 0\} \geq P_{\text{дов}}; , \quad (8)$$

$$\Pr\{g_i(d, u, \xi) \leq 0\} \geq P_{\text{дов}}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

В задаче (7) – (9) определяем наименьшее значение α^* переменной α , для которой условия (8), (9) выполняются с заданной вероятностью $P_{\text{дов}}$; решением задачи (7) – (9) является точка $[d^*, u^*, \alpha^*]$.

Используя ту же целевую функцию, можно свести задачу оптимизации с жесткими ограничениями к следующей задаче оптимизации со смешанными ограничениями:

$$\min_{(d, u) \in D \times H, \alpha} \alpha; \quad (10)$$

$$\Pr\{\varphi(d, u, \xi) - \alpha \leq 0\} \geq P_{\text{дов}}; , \quad (11)$$

$$\max_{\xi \in \Xi} g_i(d, u, \xi) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m. \quad (12)$$

Сформулируем задачу оптимизации со смешанными ограничениями, в которой m_1 ограничений являются жесткими, а остальные $(m - m_1)$ – мягкими:

$$I(d^*, u^*) = \min_{(d, u) \in D \times H} \{I(d, u) = M_\xi[\varphi(d, u, \xi)]\}; \quad (13)$$

$$\Pr\{g_i(d, u, \xi) \leq 0\} \geq P_{\text{дов}}, \quad j = 1, 2, \dots, m_1; \quad (14)$$

$$\max_{\xi \in \Xi} g_i(d, u, \xi) \leq 0, \quad j = m_1 + 1, 2, \dots, m. \quad (15)$$

Постановка двухэтапной задачи оптимизации при проектировании технологических систем

При формулировании двухэтапных задач оптимизации исходят из предположения о том, что неопределенные параметры (или их часть) ξ могут быть идентифицированы на этапе эксплуатации производства, и в этом случае оптимальные задания регуляторам $u(\xi)$ могут быть изменены в целях выполнения регламентных требований и проектных ограничений, а также повышения эффективности производства. Решение двухэтапной задачи проектирования позволит определить оптимальные конструктивные переменные d^* и зависимости $u^*(\xi)$ режимных переменных (оптимальных заданий регуляторам САС) от неопределенных параметров, которые могут изменяться в заданной области неопределенности Ξ , и далее на стадии эксплуатации технологической системы (БТС, ХТС) произвести расчет соответствующих оптимальных заданий регуляторам САС – $u^*(\hat{\xi})$ в зависимости от измеренных (уточненных) значений $\hat{\xi}$ вектора неопределенных параметров.

В двухэтапной задаче интегрированного проектирования возможны два случая: а) конструктивные переменные a, d не изменяются на этапе эксплуатации производства, в то время как переменные u могут изменяться; б) переменная a и часть конструктивных переменных $d^\lambda, \lambda = 1, 2, \dots, k_1$ не изменяются на этапе эксплуатации производства, в то время как другая часть конструктивных переменных $d^\lambda, \lambda = k_1 + 1, 2, \dots, k$; и режимные переменные u (оптимальные задания регуляторам САС) могут изменяться. В частности, это свойство позволяет настраивать другую часть конструктивных $d^\lambda, \lambda = k_1 + 1, 2, \dots, k$ параметров наряду с управляющими u переменными для выполнения проектных ограничений и повышения эффективности производства. Речь здесь идет о блочно-модульном аппаратурном оформлении технологической системы (БТС, ХТС), предполагающим наличие избыточного числа модулей в составе системы. Далее будем считать, что часть неизменяемых на этапе эксплуатации производства конструктивных переменных $d^\lambda, \lambda = 1, 2, \dots, k_1$ являются компонентами вектора d , а другая изменяемая часть конструктивных переменных $d^\lambda, \lambda = k_1 + 1, 2, \dots, k$ является компонентами вектора управляющих переменных u .

Сформулируем двухэтапную задачу оптимизации конструктивных и режимных (оптимальных заданий регуляторам САС) переменных при использовании следующих предположений: 1) на этапе эксплуатации производства в каждый момент времени выполняется уточнение всех неопределенных параметров ξ тех-

нологической системы на основе доступной экспериментальной информации; 2) ограничения с номерами $j \in J_1 = \{1, 2, \dots, m_1\}$ являются жесткими, а ограничения с номерами $j \in J_2 = \{1, 2, \dots, m_1\}$ – мягкими и должны быть удовлетворены с заданной вероятностью $P_{\text{дов}}$.

В качестве критерия оптимизации двухэтапной задачи целесообразно использовать верхнюю границу α исходной целевой функции $\varphi(d, u, \xi)$:

$$I(d^*, u^*(\xi), \xi) = \min_{d, u(\xi), \alpha} \alpha; \quad (16)$$

$$\Pr_{\xi} \{g_0 = \varphi(d, u(\xi), \xi) - \alpha\} \geq P_{\text{дов}}; \quad (17)$$

$$\Pr_{\xi} \{g_i(d, u(\xi), \xi) \leq 0\} \geq P_{\text{дов}}, \quad j \in J_1; \quad (18)$$

$$\chi(d, J_2) = \max_{\xi \in \Xi} \min_u \max_{j \in J_2} g_j(d, u, \xi) \leq 0. \quad (19)$$

В задаче (16) – (19) α – скалярная переменная, зависящая от значений конструктивных d и режимных u переменных (оптимальных заданий регуляторам САС).

Один из возможных алгоритмов решения задачи (1) – (4) показан в работе [11], в соответствии с которым осуществляется многомерная интерполяция функций $u \equiv u(\xi)$ по известным дискретным точкам $\xi^i, u^i, i \in I^{(v)}$ с помощью процедуры кусочно-постоянной аппроксимации или многомерных кубических сплайнов.

Заключение

Наиболее существенными результатами данной статьи являются методология интегрированного проектирования работоспособных (гибких) технологических систем (био- и химико-технологических систем), формирующих предпосылки эффективного управления и автоматизации, а также постановки одно- и двухэтапных задач оптимизации конструктивных параметров и режимных переменных (заданий регуляторам САС) технологической системы при интегрированном проектировании производства в условиях неопределенности.

Важным результатом также является методика выбора структуры системы автоматической стабилизации режимов работы технологической системы с использованием множеств регулируемых переменных и допустимых управляющих воздействий и учетом оценки затрат на разработку необходимых приборов автоматического контроля, возможности и точности прогноза выходных координат технологической системы, ее управляемости с той или иной комбинацией управляющих воздействий при интегрированном проектировании технологических систем.

Ценность полученных результатов заключается в том, что при интегрированном проектировании технологических систем проектно-конструкторские решения принимаются в условиях неопределенности исходной информации (исходных данных для проектирования), и это обстоятельство учитывается в математической постановке задачи оптимизации. При решении задачи интегрированного проектирования получаем гарантированный результат устойчивого функционирования технологических систем в составе производства независимо от нашей несведомленности относительно точности неопределенных факторов в исходных данных для проектирования производства.

Методология интегрированного проектирования био- и химико-технологических систем может быть использована при интегрированном проектировании сложных технических и технологических систем различного назначения.

Список литературы

1. Grossmann, I. E. Optimum Design of Chemical Plants with Uncertain Parameters / I. E. Grossmann, R. W. H. Sargent // *AIChE Journal*. – 1978. – No. 4. – P. 1021 – 1028.
2. Halemane, K. P. Optimal Process Design under Uncertainty / K. P. Halemane, I. E. Grossmann // *AIChE Journal*. – 1983. – No. 29. – P. 425 – 433.
3. Floudas, C. A. Synthesis of Flexible Heat Exchanger Networks with Uncertain Flowrates and Temperatures / C. A. Floudas, I. E. Grossmann // *Comp. Chem. Eng.* – 1987. – No. 4. – P. 319 – 336.
4. Biegler, L. T. Systematic Methods of Chemical Process Design / L. T. Biegler, I. E. Grossmann, A. W. Westerberg. – Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall, 1997. – 796 p.
5. Островский, Г. М. Технические системы в условиях неопределенности: анализ гибкости и оптимизация / Г. М. Островский, Ю. М. Волин. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 319 с.
6. Дворецкий, Д. С. Новые подходы к проектированию химико-технологических процессов, аппаратов и систем в условиях интервальной неопределенности / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Г. М. Островский. – М. : Спектр, 2012. – 344 с.
7. Островский, Г. М. Оптимизация технических систем / Г. М. Островский, Н. Н. Зиядинов, Т. В. Лаптева. – М. : КНОРУС, 2012. – 432с.
8. Дворецкий, Д. С. Проектирование управляемых процессов и аппаратов пищевых и химических технологий в условиях неопределенности. Часть 1. Одноэтапные задачи и алгоритмы интегрированного проектирования / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Г. М. Островский // *Вестник Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 66 – 85.
9. Дворецкий, Д. С. Проектирование управляемых процессов и аппаратов пищевых и химических технологий в условиях неопределенности. Часть 2. Двухэтапные задачи и алгоритмы интегрированного проектирования / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Г. М. Островский // *Вестник Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 481 – 495.
10. Swaney, R. E. An Index for Operational Flexibility in Chemical Process Design. Part I: Formulation and theory / R. E. Swaney, I. E. Grossmann // *AIChE Journal*. – 1985. – Vol. 31, No. 4. – P. 621 – 644. doi: 10.1002/aic.690310412
11. Дворецкий, Д. С. Интегрирование проектирование гибких химико-технологических процессов, аппаратов и систем управления / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий // *Теоретические основы химической технологии*. – 2014. – Т. 48, № 5. – С. 557 – 564. doi: 10.7868/S0040357114050030

Setting Optimization Problems in the Integrated Design of Technological Processes, Devices and Control Systems in Conditions of Uncertainty

S. I. Dvoretzky, D. S. Dvoretzky, E. I. Akulinin✉

*Department of Technologies and Equipment for Food and Chemical Industries,
bio-topt@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: flexible technological systems; integrated design; design parameters; optimality criterion; methodology; uncertainty in the initial information; one- and two-stage optimization problems; optimal tasks for regulators; mode state variables; automatic control system; functions-constraints.

Abstract: An attempt was made to develop a methodology for the integrated design of workable (flexible) technological processes, devices and systems (bio- and chemical-technological) and to formalize possible approaches to solving problems of optimizing design parameters and operating variables (optimal tasks for regulators of an automatic control system) at individual stages of a multi-stage iterative procedure for solving the problem of integrated design of technological systems under conditions of uncertainty. The formulation of one- and two-stage optimization problems in integrated design takes into account the presence of interval uncertainty of factors, which, provided they are solved, allows us to hope for achieving safe and optimal (in the sense of a minimum of reduced costs, the cost of manufactured products and other indicators of production efficiency) functioning of technological processes, devices and systems regardless of the presence of uncertain factors in the source information.

References

1. Grossmann I.E., Sargent R.W.H. Optimum Design of Chemical Plants with Uncertain Parameters, *AIChE Journal*, 1978, no. 4, pp. 1021-1028.
2. Halemane K.P., Grossmann I.E. Optimal Process Design under Uncertainty, *AIChE Journal*, 1983, no. 29, pp. 425-433.
3. Floudas C.A., Grossmann I.E. Synthesis of Flexible Heat Exchanger Networks with Uncertain Flowrates and Temperatures, *Comp. Chem. Eng.*, 1987, no. 4, pp. 319-336.
4. Biegler L.T. Grossmann I.E., Westerberg A.W. *Systematic Methods of Chemical Process Design*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997, 796 p.
5. Ostrovskiy G.M., Volin Yu. M. *Tekhnicheskiye sistemy v usloviyakh neopredelennosti: analiz gibkosti i optimizatsiya* [Technical systems under conditions of uncertainty: flexibility analysis and optimization], Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008, 319 p. (In Russ.)
6. Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Ostrovskiy G.M. *Novyye podkhody k proyektirovaniyu khimiko-tekhnologicheskikh protsessov, apparatov i sistem v usloviyakh interval'noy neopredelennosti* [New approaches to the design of chemical-technological processes, devices and systems under conditions of interval uncertainty], Moscow: Spektr, 2012, 344 p. (In Russ.)
7. Ostrovskiy G.M., Ziyatdinov N.N., Lapteva T.V. *Optimizatsiya tekhnicheskikh sistem* [Optimization technical system], Moscow: KNORUS, 2012. – 432 p. (In Russ.)
8. Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Ostrovskiy G.M. [Design of controlled processes and apparatus of food and chemical technologies under conditions of uncertainty. Part 1. One-stage problems and integrated design algorithms], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 66-85. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I., Ostrovskiy G.M. [Design of controlled processes and apparatus of food and chemical technologies under conditions of uncertainty. Part 2. Two-stage problems and integrated design algorithms], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 3, pp. 481-495.
10. Swaney R.E., Grossmann I.E. An Index for Operational Flexibility in Chemical Process Design. Part I: Formulation and theory, *AIChE Journal*, 1985, vol. 31, no. 4, pp. 621-644. doi: 10.1002/aic.690310412
11. Dvoretzkiy D.S., Dvoretzkiy S.I. [Integrated Design of Flexible Chemical Processes, Devices, and Control Systems], *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2014, vol. 48, no. 5, pp. 557-564. doi: 10.7868/S0040357114050030 (In Russ., abstract in Eng.)

Feststellung der Optimierungsaufgaben beim integrierten Entwurf technologischer Prozesse, Apparate und Steuerungssysteme unter Unsicherheitsbedingungen

Zusammenfassung: Es ist der Versuch unternommen, eine Methodik des integrierten Entwurfs von funktionsfähigen (flexiblen) technologischen Prozessen, Apparaten und Systemen (bio- und chemisch-technologischen) zu entwickeln und mögliche Ansätze zur Lösung von Problemen der Optimierung von Entwurfsparametern und Betriebsgrößen (optimalen Zuweisungen zu den Reglern des automatischen Steuerungssystems) auf separaten Stufen eines mehrstufigen iterativen Verfahrens zur Lösung des Problems des integrierten Entwurfs von technologischen Systemen unter Unsicherheit zu formalisieren. Die Formulierungen der ein- und zweistufigen Optimierungsprobleme des integrierten Entwurfs berücksichtigen das Vorhandensein der Intervallunsicherheit der Faktoren, was bei ihrer Lösung die Hoffnung auf das Erreichen eines sicheren und optimalen (im Sinne eines Minimums an reduzierten Kosten, Produktionskosten und anderen Indikatoren der Produktionseffizienz) Funktionierens der technologischen Prozesse, Apparate und Systeme unabhängig vom Vorhandensein der unsicheren Faktoren in den Ausgangsinformationen ermöglicht.

Définition des objectifs d'optimisation pour la conception intégrée des procédés, des appareils et des systèmes de commande dans les conditions d'incertitude

Résumé: Est mis au point une méthodologie pour la conception intégrée des processus, des appareils et des systèmes technologiques (flexibles) utilisables (bio-, chimique et technologique) et pour la formalisation des approches possibles pour résoudre les problèmes d'optimisation des paramètres de conception et des variables de mode (tâches optimales pour les régulateurs du système de commande automatique) à certaines étapes d'une procédure itérative en plusieurs étapes pour résoudre le problème de la conception intégrée des systèmes technologiques dans des conditions d'incertitude. Les tâches d'optimisation en une ou deux étapes dans la conception intégrée tiennent compte de l'incertitude des facteurs d'intervalle, ce qui, si elles sont résolues, permet d'atteindre un fonctionnement sûr et optimal (en termes de coûts réduits minimaux, de coûts de production et d'autres indicateurs de l'efficacité de la production) des processus technologiques, des appareils et des systèmes, indépendamment de la présence des facteurs incertains dans l'information initiale.

Авторы: *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Дворецкий Дмитрий Станиславович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; *Акулинин Евгений Игоревич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.