УДК 66.012-52

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ПРОЦЕССОВ И АППАРАТОВ ПИЩЕВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ. ЧАСТЬ 1. ОДНОЭТАПНЫЕ ЗАДАЧИ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Д. С. Дворецкий[1], С. И. Дворецкий[1], Г. М. Островский[2]

Кафедра «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (1); topt@topt.tstu.ru;
ОАО «Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский физико-химический институт имени Л. Я. Карпова», г. Москва (2)

Ключевые слова и фразы: аппарат; инерционность; одноэтапная задача оптимизации; пищевые и химические технологии; проектирование; регулируемость; система автоматической стабилизации; статическая оптимизация; технологический процесс; управляемость; функция гибкости.

Аннотация: Предложены методология проектирования гибких (работоспособных) технологических процессов и аппаратов химических и пищевых технологий, формирующих предпосылки эффективного управления и автоматизации, и формализация многоэтапной итерационной процедуры решения задач интегрированного проектирования гибких автоматизированных технологических (или технических) систем пищевых и химических производств. Разработана методика расчета конструктивных параметров и режимных переменных (оптимальных заданий регуляторам системы автоматической стабилизации) аппаратурно-технологического оформления технических систем пищевых и химических технологий, при которых обеспечивается оптимальное (в смысле энерго- и ресурсосбережения и качества выпускаемой продукции) и безопасное функционирование технологических процессов, аппаратов и систем пищевых и химических технологий.

Введение

В настоящее время важное значение приобретают теоретические и прикладные научные исследования, связанные с проектированием гибких (работоспособных) технологических процессов, аппаратов и систем (линий) пищевых и химических технологий с высоким уровнем автоматизации, экономичности, энерго- и ресурсосбережения, экологической чистоты [1 – 3].

Проблема совместного проектирования технологических процессов, аппаратов, линий и систем автоматического управления режимами их функционирования ставилась и частично решалась на протяжении многих десятилетий в работах [1 – 8]. Однако до настоящего времени нет законченной теории и сравнительно простых (инженерных) вычислительных алгоритмов для комплексного решения этой сложной многокритериальной проблемы.

Проектно-конструкторские решения при проектировании управляемых процессов и аппаратов пищевых и химических технологий принимаются в условиях неопределенности (противоречий), связанных с неполнотой имеющейся информации на ранних этапах проектирования, с грубым (неточным) описанием (моделированием) технологических процессов и аппаратов пищевых и химических производств, использованием упрощенных методик оценки показателей эффективности их функционирования и т.п. В связи с этим принципиально важно рассматривать при проектировании влияние неопределенных параметров на работоспособность и оптимальность функционирования проектируемых технических систем (**ТС**) (технологических процессов и аппаратов) пищевых и химических производств, а также изучить возможность формирования предпосылок эффективного управления ими [1].

Анализ традиционных подходов к проектированию ТС пищевых и химических технологий показывает, что стремление добиться максимальной эффективности функционирования ТС в статических режимах с точки зрения энерго- и ресурсосбережения, как правило, приводит к выбору таких конструктивных параметров технологических аппаратов, при которых ухудшаются их динамические характеристики. В этом случае для обеспечения гибкости ТС требуется использование сложных, а следовательно, дорогостоящих систем автоматического управления (**САУ**) режимами функционирования ТС [3]. В то же время для улучшения динамических свойств ТС и снижения общей стоимости проекта часто оказывается достаточно небольших изменений в конструкции или конструктивных переменных технологического оборудования [4].

Таким образом, при проектировании управляемых технологических процессов, аппаратов и систем пищевых и химических технологий оптимальные конструктивные параметры ТС, режимы функционирования ТС, класс и структура САУ должны выбираться из условия эффективной работы автоматизированного комплекса «ТС – САУ» с точки зрения энерго- и ресурсосбережения, экологической безопасности и качества функционирования [3, 7 – 9].

Методика проектирования управляемых ТС пищевых и химических технологий

Традиционная стратегия проектирования ТС и САУ пищевых и химических технологий представляет собой последовательный анализ альтернативных вариантов «ТС – САУ» или, другими словами, – последовательное решение двух блоков задач:

1) в первом блоке решаются задачи выбора типа $a \in A$ аппаратурного оформления ТС, набора переменных состояния (статических режимов или рабочих точек) $z \in Z$ ТС, множества H альтернативных структур САУ (системы связей $h \in H$ между переменными состояния (рабочими точками функционирования ТС в статике) $z \in Z$ и управляющими переменными $u \in U$ ТС), расчета размеров $d \in D$ технологического оборудования и оптимальных стационарных режимов $z^* \in Z$ (оптимальных заданий регуляторам системы автоматической стабилизации (**САС**)) функционирования ТС (с использованием математических моделей статики);

2) во втором блоке решаются задачи синтеза ТС с заданными динамическими характеристиками, выбора класса $b \in B$ САУ, конструирования алгоритмов оптимального управления ТС или расчета оптимальных настроек $s^* \in S$ регуляторов САС, поддерживающих оптимальные стационарные режимы (рабочие точки) функционирования $z^* \in Z$ ТС с заданной точностью.

В первом блоке после выбора типа $a \in A$ аппаратурного оформления технологических процессов пищевых и химических производств осуществляется конструирование ТС (технологических аппаратов и систем) с предпосылками эффективного управления и автоматизации. Задаются альтернативные наборы переменных состояния $z \in Z$ ТС и осуществляется синтез оптимальной структуры $h^* \in H$ САУ (системы связей между теми или иными наборами переменных состояния $z \in Z$ и управляющими переменными $u \in U$ ТС). Далее проводится расчет оптимальных стационарных режимов $z^* \in Z$ (оптимальных заданий регуляторам САС) функционирования ТС с использованием математических моделей статики путем решения одно- или двухэтапных задач оптимизации в условиях неопределенности [5, 6].

При проектировании сложных ТС пищевых и химических технологий требуется декомпозиция задачи, разработка стратегии применения методов автоматизированного проектирования, поскольку допустимая область проектных параметров $A \times B \times H \times D \times Z \times S \times \Xi$ строится в ходе самого процесса проектирования (рис. 1). Этого можно добиться только на основе интегрированного подхода к проектированию ТС, ее аппаратурно-технологического оформления и САУ в рамках единой постановки задачи.

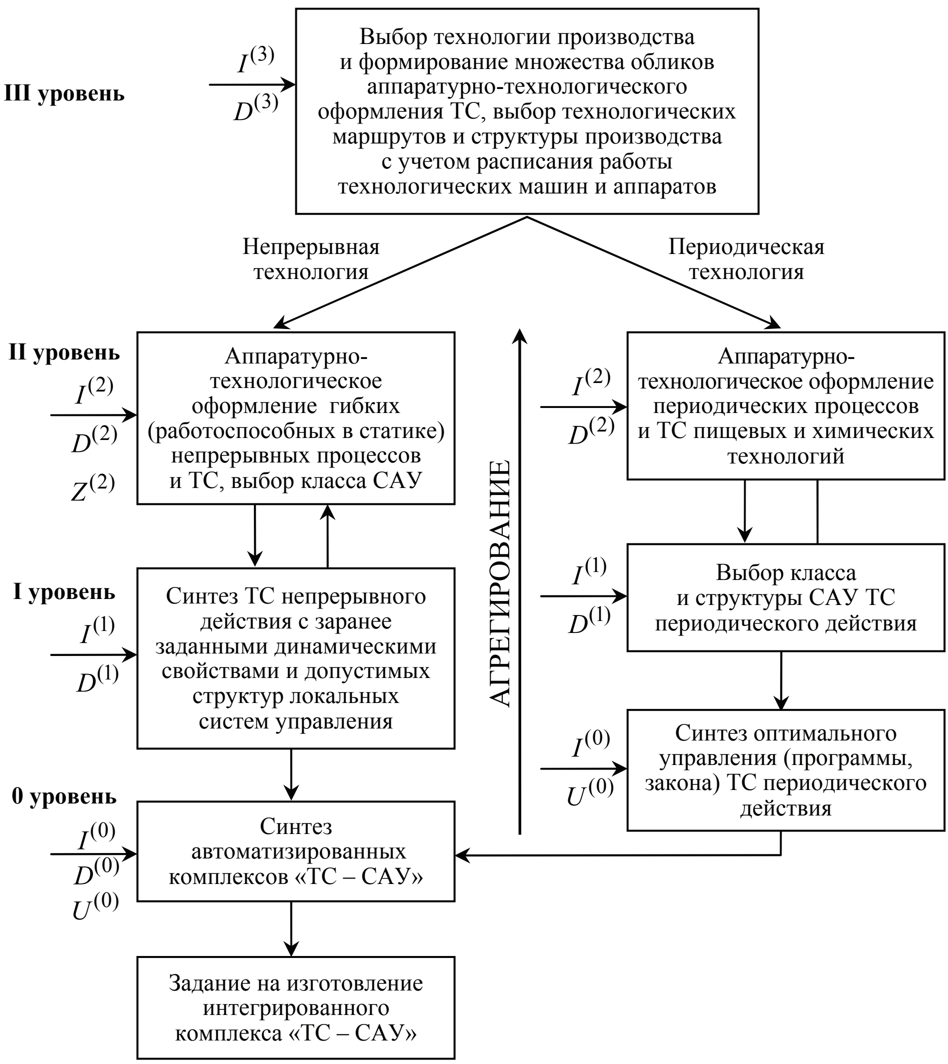

Рис. 1. Стратегия проектирования ТС пищевых и химических технологий

При традиционном проектировании ТС пищевых и химических производств при выборе структуры САУ часто предполагалось, что каналы управления технологическим аппаратом известны. В этом случае решение проблемы управляемости переносилось на стадию инженерного творчества и выполнялось средствами опыта и интуиции проектировщика. Считалось очевидным, что грамотный инженер не мог предложить неуправляемую систему. Однако для сложных ТС пищевых и химических технологий не всегда следует полагаться на опыт и интуицию, поскольку ошибки при выборе неуправляемой структуры САУ могут привести к большим затратам средств и времени, связанными с необходимостью последующего перепроектирования ТС.

Проблема нахождения условий управляемости (возможности приведения ТС в заданное состояние с помощью управляющих воздействий) и наблюдаемости (возможности определения переменных состояния $z \in Z$ ТС по результатам измерения физических переменных в системе), то есть краеугольных условий работоспособности ТС встала перед исследователями тогда, когда им самим пришлось вплотную заняться проблемой синтеза регуляторов, синтеза не в смысле усовершенствования заданной конструктором стержневой структуры, а такого синтеза, получившего название «аналитического конструирования», при котором следовало начинать с поиска алгоритма действия регулятора и реализующей его структуры по заданной цели управления [3].

Задача регулирования может трактоваться как задача перевода ТС из одного заданного состояния в другое за конечное время. Для перевода ТС в начало координат из любого другого состояния за бесконечное время достаточно, чтобы состояние в начале координат являлось асимптотически устойчивым в целом. Перевод за конечное время требует выполнения дополнительных условий управляемости.

Выбор структуры управления ТС начинается с определения множеств управляемых (наблюдаемых) переменных $z \in Z$ и управляющих воздействий $u \in U$. Для проверки управляемости технологического процесса, как правило, используются линеаризованные модели стационарных ТС

$$\dot{z} = Az + Bu, \tag{1}$$

а множество наблюдаемых выходных переменных представляется в общем случае матрицей *C*:

$$y = Cz + Du;$$

$$z \in E^n,\ u \in E^r,\ y \in E^k,$$

где z – вектор переменных состояния объекта управления; y – вектор наблюдаемых выходных переменных ТС; u – вектор управляющих воздействий; размерности векторов z, y, u соответственно равны n, k и r; размерности матриц A, B, C, D соответственно $n \times n$, $n \times r$, $k \times n$ и $k \times r$.

Концепция управляемости, предложенная Калманом [10], утверждает, что линейная система вполне управляема, если может быть переведена в начало координат из другого некоторого терминального состояния (в начальный момент времени) за конечное время с использованием кусочно-непрерывного управления $u(t)$.

Если A и B постоянные матрицы, то пара (A, B) вполне управляема тогда и только тогда, когда

$$\operatorname{rank}\left(B,\ AB,\ A^2B, \ldots,\ A^{n-1}B\right) = n. \tag{2}$$

Сделаем ряд критических замечаний, которые следует учитывать при использовании ранговых критериев управляемости в задачах синтеза структуры систем управления.

1. Достижение начала координат $y^{(1)} = y(t_1)$ из некоторого терминального состояния может потребовать от ТС недопустимо больших изменений управляющих переменных.

2. Если управление ограничено, то можно и не достичь $y^{(1)}$ за вполне определенное время или вообще.

3. Ранговые критерии управляемости не дают информации относительно качества регулирования при действии различных возмущений.

4. Исследование ранга системы дает лишь ответ на вопрос: можно ли перевести ТС из одного заданного состояния в другое за конечное время.

5. Не всегда можно достоверно определить ранг матрицы, так как большинство параметров ТС известно с ошибкой.

6. Ранговый критерий управляемости нельзя применить для исследования систем управления с запаздыванием.

Эти замечания подчеркивают то обстоятельство, что сформулированное условие управляемости не является «вполне достаточным» в случае его применения к синтезу промышленных систем управления. Кроме того, при использовании рангового критерия управляемости необходимо учитывать, какие критерии применялись для проектирования самой ТС.

В связи с этим становится необходимым расширение базовых концепций, в рамках которых могут быть преодолены вышеназванные трудности.

Для осуществления управления – независимо от того, выполняется оно автоматически или вручную, необходимо иметь информацию о текущем состоянии ТС, то есть о значениях переменных состояния $z(t)$ в каждый момент времени в непрерывной ТС или же в моменты квантования системы с дискретным временем. Однако некоторые из переменных z_i являются абстрактными переменными, не имеют физического аналога в реальной ТС и не могут поэтому быть измерены. Измеряемыми и наблюдаемыми в ТС являются физические выходные переменные y, через которые должны однозначно выражаться все составляющие вектора состояния z. Очевидно, что y также должны выражаться через z.

Рассмотрим линейную стационарную ТС (1). Состояние $z(t)$ называется наблюдаемым, если в момент наблюдения $t = t_0$ можно однозначно определить $z(t_0)$ по данным измерения $y(t)$ и $u(t)$ на конечном интервале времени $t_0 \le t \le t_1$, $t_1 > t_0$. Техническая система называется полностью наблюдаемой, если наблюдаемы все ее состояния в любые моменты времени.

Если A и C постоянные матрицы, то пара (C, A) вполне наблюдаема тогда и только тогда, когда

$$\operatorname{rank}\left(C^T, A^T C^T, \ldots, (A^T)^{n-1} C^T\right) = n.$$

Наблюдаемость не страдает недостатками, подобными тем, которые указаны для управляемости.

В работе [11] впервые указано, что неуправляемость систем часто возникает при неудачном выборе параметров в матрицах A и B. Поэтому структурное представление системы исключает эту ошибку.

В некоторых достаточно простых случаях возможно более эффективным средством синтеза структуры системы управления окажется применение эвристических правил. Однако и в этих случаях при проектировании следует предусмотреть обязательную проверку выполнения условий структурной управляемости [11] во избежание ошибок и необходимости перепроектирования САУ.

Итак, синтез структуры $h \in H$ системы управления режимами функционирования ТС начинают с построения математической модели ее динамики, отображающей связи между выходными переменными ТС и входными (управляющими) переменными, и выбора (анализа) множества выходных переменных, управление которыми приводит к достижению поставленных целей.

Еще одним важнейшим компонентом работоспособности ТС пищевых и химических технологий является способность ТС иметь допустимые рабочие точки (режимы) функционирования для всего диапазона Ξ неопределенных условий, которые могут возникать в процессе эксплуатации ТС.

Задача анализа работоспособности проектируемой ТС, определяемой векторами проектных параметров a и d, заключается в определении режимных переменных z (заданий регуляторам САС) таких, чтобы выполнить ограничения (требования по спецификации качества выпускаемой продукции, производительности, экологической безопасности производства, энерго- и ресурсоэффективности и др.), описываемые неравенствами вида

$$g_j(a, d, z, \xi) \le 0, \quad j \in J, \tag{3}$$

для $\forall \xi \in \Xi$.

Рассмотрим при фиксированном ξ следующую задачу

$$\eta(a, d, \xi) = \min_{z} \max_{j \in J} g_j(a\ d, z, \xi), \tag{4}$$

где $\eta(a, d, \xi)$ – функция выполнимости ограничений (1). Если $\eta(a, d, \xi) \le 0$, то проектируемая ТС, описываемая векторами a и d, работоспособна при фиксированном ξ; в противном случае, при $\eta(a, d, \xi) > 0$ – неработоспособна при фиксированном ξ.

При $\eta(a, d, \xi) = 0$ проектируемая ТС с векторами a и d находится на границе допустимой области функционирования, поскольку в этом случае $g_j(a, d, z, \xi) = 0$ хотя бы для одного номера $j \in J$. Задачу (4) можно переформулировать в форме стандартной задачи математического программирования, определяя скалярную величину α такую, что

$$\eta(a, d, \xi) = \min_{z,\, \alpha} \alpha \tag{5}$$

при ограничениях

$$g_j(a, d, z, \xi) \le \alpha, \quad j \in J. \tag{6}$$

Если $g_j(\cdot)$ – нелинейные функции по z, то задача (5), (6) представляет собой задачу нелинейного программирования.

Для установления работоспособности проектируемой ТС пищевых и химических технологий необходимо убедиться в том, что $\eta(a, d, \xi) \le 0$ для $\forall \xi \in \Xi$. В этом случае задача анализа гибкости проектируемой ТС, описываемой вектором проектных параметров d, может быть сформулирована в виде

$$\chi(a, d) = \max_{\xi \in \Xi} \eta(a, d, \xi), \tag{7}$$

где $\chi(a, d)$ соответствует функции гибкости проекта ТС с векторами a и d.

При $\chi(a,d) \le 0$ допустимое функционирование (работоспособность) ТС может быть достигнуто для всей области Ξ возможных изменений вектора неопределенных параметров ξ. При $\chi(a,d) > 0$ допустимое функционирование ТС невозможно для некоторой подобласти Ξ.

Эффективность функционирования ТС пищевых и химических технологий в статических режимах оценивается заданной целевой функцией. При этом в качестве множества вариантов A аппаратурного оформления ТС задаются альтернативные возможные конструкции аппаратов $a \in A$. В качестве класса систем автоматического управления ТС непрерывного действия рассмотрим САС заданных статических режимов функционирования ТС.

Выбор структуры локальных САС осуществляется при решении задач первого блока с использованием множеств регулируемых (наблюдаемых) переменных и допустимых управляющих воздействий. При этом выбранные каким-либо образом структуры $h \in H$ локальных САС ранжируются по критерию экономической целесообразности с учетом наблюдаемости выходных переменных ТС, оценки затрат на разработку необходимых датчиков и приборов автоматического контроля, возможности и точности прогноза выходных переменных по косвенным показателям, управляемости ТС с той или иной комбинацией управляющих воздействий, динамических свойств каналов управления (показателей инерционности и регулируемости объекта управления) [4, 8].

Таким образом, решение задач первого блока заключается в том, чтобы среди множества возможных вариантов (моделей) проектируемой ТС пищевых и химических технологий найти наилучшие (оптимальные в том или ином смысле) альтернативы. В этой фразе важное значение имеет каждое слово. Говоря «наилучшие», предполагаем, что у нас имеется целевая функция (критерий или ряд критериев), способ (способы) сравнения альтернативных вариантов. При этом важно учесть имеющиеся условия, ограничения, так как их изменение может привести к тому, что при одном и том же критерии (критериях) наилучшими окажутся другие варианты (альтернативы) автоматизированного комплекса «ТС – САУ».

Понятие оптимальности получило строгое и точное представление в различных математических теориях, прочно вошло в практику проектирования и эксплуатации ТС, сыграло важную роль в формировании современных системных представлений, стало понятием, известным практически каждому человеку. Различие между строго научным, математическим и «общепринятым», житейским пониманием оптимальности невелико. Если не вдаваться в подробности теории оптимизации с использованием математических моделей, то интуитивно оптимизация сводится, в основном, к сокращению числа альтернатив. Если специально стремиться к тому, чтобы на начальной стадии было получено как можно больше альтернатив, то для некоторых задач их число может быть достаточно большим. Очевидно, что подробное изучение каждой из них приведет к неприемлемым затратам времени и средств. На этапе неформализованной оптимизации рекомендуется проводить «грубое отсеивание» альтернатив, проверяя их на присутствие некоторых качеств, желательных для любой приемлемой альтернативы. К признакам «хороших» альтернатив относятся надежность, многоцелевая пригодность, адаптивность, другие признаки «практичности». В отсеве могут помочь также обнаружение отрицательных побочных эффектов, недостижение контрольных уровней по некоторым важным показателям (например, слишком высокая стоимость или сложность системы) и пр. Предварительный отсев не рекомендуется проводить слишком жестко; для детального анализа и дальнейшего выбора необходимы хотя бы несколько альтернативных вариантов.

Общим для задач принятия оптимальных решений, которые возникают в первом блоке задач при проектировании ТС и САУ пищевых и химических технологий, является то, что они могут быть сформулированы математически в форме задач нелинейного (для детерминированных объектов проектирования) или стохастического программирования (для стохастических объектов или при проектировании объектов в условиях неопределенности). Решение таких задач требует индивидуального подхода и связано с необходимостью применения различных методов поиска оптимальных решений, привлечения квалифицированных и опытных проектировщиков. В связи с этим в интегрированных системах автоматизированного проектирования (**САПР**) ТС пищевых и химических технологий большое внимание отводится вопросам принятия оптимальных решений в интерактивном режиме, когда проектировщик имеет возможность оперативно взаимодействовать с ЭВМ на любом этапе решения задачи. При этом в результате диалога он может изменять как число, так и тип варьируемых (оптимизируемых) переменных, выбирать наиболее эффективный в сложившейся ситуации метод поиска, подстраивать численные параметры методов к конкретным особенностям целевой функции (критерия эффективности) оптимального проектирования ТС.

Такой подход к принятию оптимальных решений в интегрированных САПР ТС пищевых и химических технологий позволяет осуществлять адаптацию методов оптимизации к особенностям и трудностям конкретной практической задачи, но для этого проектировщик должен понимать, в каких случаях и какие методы оптимизации необходимо применять для того или иного класса задач оптимизации, возникающих на различных этапах проектирования ТС.

Аппаратурно-технологическое оформление технологических процессов пищевых и химических производств в условиях неопределенности

Для определения конструктивных и режимных (оптимальных заданий регуляторам САС) переменных при проектировании ТС (технологических аппаратов и систем) пищевых и химических технологий формулируются, как правило, одно- и двухэтапные задачи оптимизации в условиях интервальной неопределенности части исходных данных для проектирования [2, 3, 6].

На этапе проектирования ТС будем различать два случая. В первом случае неизвестны плотности распределения вероятностей неопределенных параметров $\xi \in \Xi$. В этом случае интервалы неопределенности измеряемых параметров могут быть найдены, если известны максимальные ошибки измерения используемых приборов.

Обозначим через ξ^j измеренные значения ξ в j-м эксперименте. Пусть проведены N экспериментов и $\xi^j = \bar{\xi}^j \pm \delta\xi^j$, где $\bar{\xi}^j$ неизвестные точные значения величин ξ, а $\delta\xi^j$ ошибки измерения. Из характеристик приборов известно максимальное значение δ ошибки $\delta\xi^j$: $\left|\delta\xi^j\right| \le \delta$.

Пусть теперь известны плотности распределения вероятностей неопределенных параметров ξ. Рассмотрим вначале случай, когда все параметры ξ_i независимы и каждый из них имеет плотность распределения вероятности $P_i(\xi_i)$. Тогда для каждого параметра ξ_i можно найти интервал $\Xi_i^{\rho_i}$, удовлетворяющий условию $\Pr\left[\xi_i \in \Xi_i^{\rho_i}\right] = \rho_i$, где $\Pr\left[\xi_i \in \Xi_i^{\rho_i}\right]$ – вероятность принадлежности параметра ξ_i интервалу $\Xi_i^{\rho_i}$. Это условие может быть записано в виде

$$\int\limits_{\Xi_i^{\rho_i}} P_i(\xi_i)\,d\xi_i = \rho_i .$$

В этом случае область неопределенности есть n_ξ-мерный прямоугольник Ξ^ρ со сторонами $\Xi_i^{\rho_i}$; вероятность попадания ξ в прямоугольник Ξ^ρ равна $\rho = \rho_1 \rho_2 \cdots \rho_{n_\xi}$. В случае нормального распределения имеем формулу

$$P_i(\xi_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\xi_i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right],$$

где $\mu_i = M\{\xi_i\}$ – среднее значение (математическое ожидание) параметра ξ_i; σ_i – среднеквадратичное отклонение.

В этом случае интервал $\Xi_i^{\rho_i}$ имеет вид

$$\Xi_i^{\rho_i} = \left[\xi : \mu_i - k_i\sigma_i \le \xi_i \le \mu_i + k_i\sigma_i \text{ , } i = 1, ..., n_\xi \right].$$

В книге [13] имеются таблицы, которые позволяют просто определить вероятности $\int\limits_{\Xi_i^{\rho_i}} P_i(\xi_i)\,d\xi_i = \rho_i$. Например, для $k_i = 3,3$ $\Pr\left[\xi_i \in \Xi_{i_i}^{\rho_i} \right] = 0,99904.$

Уровень неопределенности в задаче оптимизации зависит от полноты и точности экспериментальных данных, доступных на этапе функционирования ТС пищевых и химических технологий, то есть зависит от контрольно-измерительной системы сбора экспериментальной информации на этом этапе (наличия датчиков и приборов, их точности).

При постановке задач оптимизации и проектирования ТС в условиях неопределенности рассмотрим: 1) одноэтапную формулировку, в которой неопределенные параметры ξ (или их часть) не могут быть идентифицированы на стадии функционирования ТС, и в этом случае режимные переменные $z \in Z$ (задания регуляторам САС) определяются одновременно с определением конструктивных переменных для всей области неопределенности Ξ; 2) двухэтапную постановку задачи оптимизации, в которой предполагается, что неопределенные параметры (или их часть) ξ могут быть идентифицированы на этапе функционирования ТС, и в этом случае управляющие переменные $z(\xi)$ могут быть подстроены для выполнения регламентных требований и проектных ограничений (3). При решении двухэтапной задачи на этапе проектирования ТС определяются оптимальные конструктивные переменные d^* и зависимости $z^*(\xi)$ оптимальных заданий регуляторам САС от неопределенных параметров, а на этапе функционирования ТС производится измерение (уточнение) вектора неопределенных параметров ξ (обозначим уточненное значение через $\hat{\xi}$) и выбор оптимальных заданий регуляторам САС – $z^*(\hat{\xi})$.

Ограничения в задачах оптимизации конструктивных и режимных переменных ТС бывают трех типов: 1) жесткие, если они должны безусловно выполняться на этапе функционирования ТС для любых значений ξ, нарушение этих условий может привести к аварии, нанести ущерб окружающей среде, обслуживающему персоналу и т.д.; 2) мягкие (вероятностные), если они выполняются с некоторой заданной вероятностью или в среднем; 3) смешанные.

Назовем ТС *гибкой*, а соответствующее ей аппаратурно-технологическое оформление *допустимым,* если на этапе ее функционирования можно удовлетворить все регламентные требования и проектные ограничения (3) при условии, что неопределенные параметры ξ могут принимать любые значения из заданной области неопределенности Ξ.

При формулировании задач оптимального проектирования необходимо ввести целевую функцию и условия выполнения регламентных требований и проектных ограничений (*далее* ограничения). В качестве целевой функции используем одну из приведенных ниже оценок эффективности функционирования (будущей работы) проектируемой ТС пищевых и химических технологий:

1) среднее значение, которое может принять целевая функция (критерий) оптимизации или проектирования;

2) наихудшее значение целевой функции оптимизации или проектирования, которое она может принять (стратегия наихудшего случая);

3) верхнюю границу для критерия оптимизации или проектирования, которая не может быть нарушена с заданной вероятностью,

а в качестве ограничений – условия, гарантирующие гибкость (работоспособность), экологическую безопасность и качество функционирования ТС.

Одноэтапные задачи оптимизации

Рассмотрим формулировку одноэтапной задачи оптимизации ТС для случаев с жесткими и мягкими ограничениями в условиях неопределенности исходных данных $\xi \in \Xi$ для проектирования.

В качестве критерия оптимального проектирования аппаратов пищевой и химической технологии используем математическое ожидание $M_\xi\{\bullet\}$ от целевой функции $C(a, d, z, \xi)$) (как правило приведенные затраты на создание и эксплуатацию ТС). Объединяя целевую функцию $M_\xi\{C(a, d, z, \xi)\}$, проектные, регламентные ограничения $g_j(a, d, z, \xi) \le 0$, $j \in J$ и условие гибкости ТС – $\chi(a, d) \le 0$, сформулируем одноэтапную задачу оптимизации с жесткими ограничениями в условиях неопределенности: требуется определить тип $a^* \in A$ аппарата пищевой или химической технологии, векторы конструктивных $d^* \in D$ и режимных $z^* \in Z$ переменных, при которых достигается минимум математического ожидания целевой функции $C(a, d, z, \xi)$, то есть

$$\min_{a,d,z} M_\xi\{C(a, d, z, \xi)\} \tag{8}$$

при ограничениях

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j(a, d, z, \xi) \le 0, \; j \in J. \tag{9}$$

При формулировании одноэтапной задачи оптимизации с мягкими (вероятностными) ограничениями предположим, что известна функция распределения вероятностей $P(\xi)$ для ξ. В этом случае задача оптимизации имеет вид

$$\min_{a,d,z} M_\xi\{C(a, d, z, \xi)\}$$

при ограничениях

$$\Pr\left\{g_j(a, d, z, \xi) \le 0\right\} \ge \rho_j, \; j \in J. \tag{10}$$

Сформулируем одноэтапную задачу оптимизации конструктивных и режимных (оптимальных заданий регуляторам САС) переменных со смешанными ограничениями [12] (ограничения с номерами $j \in J_1 = \{1, ..., m_1\}$ являются мягкими, а ограничения с номерами $j \in J_2 = \{m_1 + 1, ..., m\}$ – жесткими и должны быть удовлетворены с заданной вероятностью ρ):

$$\min_{a,d,z} M_\xi \{C(a, d, z, \xi)\}$$

при ограничениях

$$\Pr_\xi \left\{g_j(a, d, z(\xi), \xi) \le 0\right\} \ge \rho_j, \quad j \in J_1; \tag{11}$$

$$\chi_1(a, d, J_2) = \max_{\xi \in \Xi} \min_z \max_{j \in J_2} g_j(a, d, z, \xi) \le 0. \tag{12}$$

В задачах (8), (9); (10) и (11), (12) находятся такие значения типа технологического аппарата, векторов конструктивных и режимных переменных, при которых достигается минимум целевой функции (8) независимо от того какое значение принимает вектор неопределенных параметров ξ в заданной области Ξ. Если решение задачи не может быть найдено для заданной области Ξ, то необходимо поэтапно уменьшать область неопределенности Ξ, то есть уточнять исходные данные для проектирования до тех пор, пока решение задачи не будет получено. Таким образом формируется техническое задание на точность определения исходной информации для проектирования управляемых процессов и аппаратов пищевых и химических технологий.

Основная трудность решения сформулированных выше задач оптимизации (8), (9); (10) и (11), (12) состоит в необходимости вычисления многомерных интегралов $M_\xi\{C(a, d, z, \xi)\}$ и $\Pr\{g_j(a, d, z, \xi) \le 0\}, j \in J$.

Заменим математическое ожидание в (8) с помощью квадратурной формулы некоторой суммой [2, 3]:

$$M_\xi\{C(a, d, z, \xi) \approx \sum_{i \in I_1} \omega_i C\left(a, d, z, \xi^i\right),$$

где ω_i – весовые коэффициенты, $\sum_{i \in I_1} \omega_i = 1$; I_1 – множество индексов аппроксимационных точек в области Ξ.

Для решения задачи (8), (9) будем использовать алгоритм внешней аппроксимации [6] и вспомогательную задачу (а).

$$I = \min_{a,d,z} \sum_{i \in I_1} \omega_i C(a, d, z, \xi^i);$$

$$g_j(a, d, z, \xi^i) \le 0, \ j = \overline{1, m}; \ \xi^i \in S_1; \ i \in I_1; \tag{a}$$

$$g_j(a, d, z, \xi^l) \le 0, \ j = \overline{1, m}; \ \xi^l \in S_2; \ l \in I_2,$$

где $S_1 = \left\{\xi^i : \xi^i \in \Xi, i \in I_1\right\}$ – совокупность аппроксимационных точек, вводимых для приближенного вычисления математического ожидания в целевой функции (8); $S_2^{(\nu)} = \left\{\xi^l : \xi^l \in \Xi, l \in I_2^{(\nu)}\right\}$ – множество критических точек, $I_2^{(\nu)}$ – множество индексов точек ξ^l, в которых нарушаются ограничения (9).

Тогда алгоритм решения задачи (8), (9) можно записать в следующем виде.

Алгоритм 1

Шаг 1. Полагаем число итераций $\nu = 1$, выбираем совокупность аппроксимационных точек ξ^i, $i \in I_1$, $\xi^i \in S_1$, начальную совокупность критических точек $S_2^{(\nu-1)} = \left\{\xi^l : \xi^l \in \Xi,\ l \in I_2^{(\nu-1)}\right\}$ и начальные приближения $a^{(0)}, d^{(0)}, z^{(0)}$.

Шаг 2. Решаем вспомогательную задачу (а)

$$I^{(\nu)} = \min_{a,d,z} \sum_{i \in I_1} \omega_i C(a, d, z, \xi^i);$$

$$g_j(a, d, z, \xi^i) \le 0,\ j = \overline{1, m};\ \xi^i \in S_1;\ i \in I_1;$$

$$g_j(a, d, z, \xi^l) \le 0,\ j = \overline{1, m};\ \xi^l \in S_2^{(\nu-1)};\ l \in I_2^{(\nu-1)},$$

и определяем $a^{(\nu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}$.

Шаг 3. Решаем m задач

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j\left(a^{(\nu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi\right),\ \ j = \overline{1, m},$$

и определяем m точек $\xi^{l,(\nu)}, l = \overline{1, m}$.

Шаг 4. Образуем множество новых критических точек на ν-й итерации

$$R^{(\nu)} = \left\{\xi^{l,(\nu)} : g_j\left(a^{(\nu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi^{l,(\nu)}\right) > 0\right\}.$$

Если это множество пустое, то решение задачи получено, *алгоритм заканчивает работу*.

В противном случае переходим к шагу 5.

Шаг 5. Формируем новое множество критических точек $S_2^{(\nu)} = S_2^{(\nu-1)} \cup R^{(\nu)}$ и, полагая ν = ν + 1, переходим к шагу 2.

Этот алгоритм дает решение задачи (8), (9), если операции на шагах 2 и 3 выполняются в глобальном смысле. Поскольку выполняется неравенство

$$g_j(a, d, z, \xi^l) \le \max_{\xi \in \Xi} g_j(a, d, z, \xi),\quad \xi^l \in \Xi,\ j = \overline{1, m},$$

то в соответствии с теоремой П.2 [6] задача (а) дает нижнюю оценку задачи (8), (9): $I^{(\nu)} \le I^*$. Пусть $\left(a^*, d^*, z^*\right)$ – решение, полученное этим алгоритмом. В точке $\left(a^*, d^*, z^*\right)$ выполняется следующее условие

$$\max_{\xi \in \Xi} g_j\left(a^*, d^*, z^*, \xi\right) \le 0,\ \ j \in J.$$

Это означает, что $\left(a^*, d^*, z^*\right)$ – допустимая точка в задаче (8), (9), и выполняется условие $I^{(\hat{\nu})} \le I^*$, где $\hat{\nu}$ – номер последней итерации алгоритма.

Поскольку точка $\left(a^*, d^*, z^*\right)$ является допустимой, то $I^{(\hat{\nu})}$ не может быть меньше I^*, поэтому $I^{(\hat{\nu})} = I^*$.

На каждой итерации алгоритм 1 выполняет две основные операции. Первая операция связана с получением нижней границы целевой функции (8). Вторая операция связана с проверкой: является ли точка $\left(a^{(\nu)},\ d^{(\nu)},\ z^{(\nu)}\right)$ решением задачи (8), (9). Для этого на шаге 3 решается m задач

$$\max_{\xi\in\Xi} g_j\left(a^{(\nu)},\ d^{(\nu)},\ z^{(\nu)},\ \xi\right),\quad j=\overline{1,m},$$

и если условие $g_j\left(a^{(\nu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi^{l,(\nu)}\right)\le 0$ удовлетворяется, то решение задачи (8), (9) найдено. В противном случае точки $\xi^{l,(\nu)}$, в которых условия нарушаются, добавляются во множество критических точек $S_2^{(\nu)}$.

Характерной чертой алгоритма 1 является увеличение числа критических точек на каждом шаге и, соответственно, увеличение числа ограничений. Это является определенным недостатком, поскольку в некоторых случаях при большом числе критических точек число ограничений может стать слишком большим.

Остановимся подробнее на шаге 3. Как правило, характер функций g_j неизвестен. В этом случае можно использовать такой подход. Предполагаем на первом этапе, что функции g_j выпуклы. В этом случае решение задачи

$$\max_{\xi\in\Xi} g_j\left(a^{(\nu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi\right),\quad j=\overline{1,m},$$

находится в одной из вершин параллелепипеда Ξ. В начальное множество критических точек $S_2^{(0)}$ включается некоторое число угловых точек куба Ξ, а на шаге 3 рассчитываются значения функций $g_j\left(a^{(\nu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi\right)$, $j=\overline{1,m}$ во всех угловых точках куба Ξ, не принадлежащих множествам $S_2^{(\nu)}$ и S_1. Среди этих точек выбираются m точек, в которых функции $g_j\left(a^{(\nu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi^l\right)$, $j, l=\overline{1,m}$ принимают наибольшие значения, из которых включаются в число критических точек те точки, в которых нарушаются ограничения (9). Далее формируем новое множество критических точек $S_2^{(\nu+1)}=S_2^{(\nu)}\cup R^{(\nu)}$ и переходим к шагу 2 алгоритма 1.

При решении одноэтапной задачи оптимизации с мягкими (вероятностными) ограничениями (10) предположим, что имеем полную информацию относительно функции распределения вероятностей для ξ.

Перепишем задачу (8), (10) в терминах A-задач стохастического программирования [9]: требуется определить тип $a\in A$ аппаратурного оформления проектируемых процессов и аппаратов пищевых и химических технологий, векторы конструктивных d_{α^*} и режимных z_{α^*} переменных (оптимальных заданий регуляторам САС), а также m-мерный вектор постоянных величин $\alpha^*=\left(\alpha_1^*, \alpha_2^*, \ldots, \alpha_m^*\right)$ такие, что

$$C(a_{\alpha^*}, d_{\alpha^*}, z_{\alpha^*}) = \min_{\alpha\in\Lambda}\left\{\min_{a,d,z}\sum_{i=I_1}\omega_i C(a,d,z,\xi^i)\mid g_j(a,d,z,\xi)\le\alpha_j,\ j\in J\right\},\quad (13)$$

$$\Lambda=\left\{\alpha\mid\forall j\ \Pr_\xi\left[g_j(a_\alpha,\ d_\alpha,\ z_\alpha,\ \xi)\le 0\right]\ge\rho_j\right\}.$$

Возможность применения метода A-задач стохастического программирования должна всегда доказываться либо аналитическим доказательством выполнения достаточных условий, либо вычислительным экспериментом, подтверждающим выполнение достаточных условий.

В соответствии с методом *А*-задач стохастической оптимизации разработан следующий алгоритм решения задачи (13).

Алгоритм 2

Шаг 1. Полагаем число итераций $\nu = 1$, задаем значения вектора гарантированной вероятности ρ_j, $j = \overline{1, m}$ и точности ε решения задачи оптимизации, множество аппроксимационных точек $S_1 = \left\{\xi^i : i \in I_1\right\}$, начальное значение вектора $\alpha^{(0)} = \left(\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, ..., \alpha_m^{(0)}\right)$ и начальные приближения $a^{(0)}, d^{(0)}, z^{(0)}$.

Шаг 2. Методом последовательного квадратичного программирования решаем вспомогательную задачу нелинейного программирования (**НЛП**)

$$I(a, d, z) = \min_{a,d,z} \sum_{i \in I_1} \omega_i C(a, d, z, \xi^i) \tag{14}$$

при связях в форме уравнений математической модели статики проектируемого технологического процесса и аппарата

$$y = \Im\left(a, d, z, \xi^i\right),$$

и ограничениях

$$g_j(a, d, z, y(a, d, z, \xi^i)) \le \alpha_j^{(\nu)}\ , \ \ \alpha_j^{(\nu)} < 0\ , \ \ j = \overline{1, m},\ \ i \in I_1. \tag{15}$$

Шаг 3. В точке $\left(a_{\alpha^{(0)}}, d_{\alpha^{(0)}}, z_{\alpha^{(0)}}\right)$, которая является решением задачи (14), (15), вычисляются вероятности выполнения ограничений $g_j(a, d, z, \xi) \le 0$ с использованием генератора случайных чисел ξ с равномерным законом распределения и математической модели

$$y = \Im(a, d, z, \xi)\,,$$

и проверяется выполнение условий

$$\Pr_\xi\left\{g_j(a, d, z\ \xi) \le 0\right\} \ge \rho_j\ ,\ \ j = \overline{1, m}\,.$$

Шаг 4. Если вероятностные ограничения не выполняются, то есть $\alpha^{(\nu)} \notin \Lambda$, включается алгоритм входа в допустимую область Λ. Простейшим алгоритмом такого типа является уменьшение $\alpha_j^{(\nu)}$ для нарушенных ограничений. Далее число ν увеличивается на 1, то есть $\nu := \nu + 1$ и следует переход к шагу 2.

Шаг 5. Если вероятностные ограничения выполняются, то вектор α^* находим из решения внешней *А*-задачи оптимизации

$$I\left(a_{\alpha^*}, d_{\alpha^*}, z_{\alpha^*}\right) = \min_{\alpha \in \Lambda} I\left(a_\alpha, d_\alpha, z_\alpha\right). \tag{16}$$

В общем случае задача (16) может быть решена подходящим методом нелинейного программирования. Однако можно использовать простейший алгоритм коррекции вектора $\alpha \in \Lambda$ путем увеличения его компонентов на величину

$$\Delta\alpha_j = \lambda^{(\nu)}\left(\Pr_\xi[g_j(\bullet) \le 0] - \rho_j\right),$$

где $\lambda^{(\nu)}$ – шаг коррекции на ν-й итерации, подбираемый опытным путем. Поиск α^* прекращается, если $\Delta\alpha_j$ для $\forall_j$ становится меньше заранее заданного малого числа ε (точность поиска α^*).

Вычисление вероятностных интегралов производится стандартными методами (латинского гиперкуба и последовательности проб Хаммерслея (*HSS*) и Монте-Карло).

Для решения одноэтапной задачи оптимизации со смешанными ограничениями (8), (11), (12) введем множества аппроксимационных точек $S_0 = \left\{ \xi^i : i \in I_0 \right\}$ для приближенного вычисление математического ожидания от целевой функции (8) и $S = \left\{ \xi^i : i \in I \right\}$ для накопления точек ξ с индексами $i \in I$, в которых нарушаются ограничения (11), (12), причем во множестве точек S_1 будут накапливаться точки, в которых нарушаются жесткие ограничения (12), а во множестве S_2 – точки, в которых нарушаются мягкие ограничения (11). Кроме того, введем обозначение $J = J_1 \cup J_2$ и в алгоритме мы используем вспомогательную задачу НЛП (б):

$$I\left(a^*, d^*, z^*, \xi\right) = \min_{a,d,z} \sum_{i \in I_0} \omega_i C\left(a, d, z, \xi^i\right);$$
$$g_j\left(a, d, z, \xi^l\right) \le 0, \quad j \in J, \quad l \in I, \quad I = I_0 \cup I_1 \cup I_2. \tag{б}$$

Решение задачи (б) заключается в нахождении типа аппаратурного оформления ТС a^*, оптимальных значений векторов конструктивных d^* и режимных (заданий регуляторам САС) переменных z^*, при которых достигается минимальное значение целевой функции (8) при условии выполнения всех ограничений задачи (11), (12) в заданном наборе точек ξ^l, $l \in I^{(\nu)}$.

Алгоритм 3

Шаг 1. Принимаем $\mu = 1$, число альтернативных типов аппаратурного оформления ТС $\mu_{\text{зад}}$ и начальное приближение для конструкции ТС $a^{(\mu)}$.

Шаг 2. Принимаем $\nu = 1$, задаем начальные множества $S_0 = \left\{ \xi^i : i \in I_0 \right\}$, $S^{(\nu-1)} = S_1^{(\nu-1)} \cup S_2^{(\nu-1)}$, $I^{(\nu-1)}$, число n номеров точек ξ^i, $i \in I^{(\nu-1)}$ и начальные приближения $d^{(\nu-1)}$, $z^{(\nu-1)}$, $i \in I^{(\nu)}$, ρ_j.

Шаг 3. Решаем вспомогательную задачу (б)

$$I\left(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi\right) = \min_{a,d,z} \sum_{i \in I_1} \omega_i C\left(a, d, z, \xi^i\right);$$
$$g_j\left(a^{(\mu)}, d, z^i, \xi^i\right) \le 0, \quad j \in J, \quad i \in I^{(\nu)},$$

и пусть $a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}$ есть решение этой задачи.

Шаг 4. Вычисляем

$$\chi_1(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}) = \max_{\xi \in \Xi} \max_{j \in J_1} g_j\left(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi\right) \tag{17}$$

с использованием алгоритма внешней аппроксимации [6]. Обозначим через $\overline{\xi}^{(\nu)}$ решение задачи (17) и проверим выполнение условия

$$\chi_1\left(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}\right) \le 0 \tag{18}$$

в точке решения $\overline{\xi}^{(\nu)}$ задачи (17). Если условие (18) не выполняется, то переходим к шагу 5, в противном случае – к шагу 6.

Шаг 5. Дополним множество точек $S_1^{(\nu)}$, в которых нарушаются ограничения (18), точкой $\bar{\xi}^{(\nu)}$, то есть

$$S_1^{(\nu)} = S_1^{(\nu-1)} \cup \bar{\xi}^{(\nu)}, \qquad I_1^{(\nu)} = I_1^{(\nu-1)} \cup (n+1),$$

увеличиваем число критических точек n на 1, $n = n+1$, и переходим к шагу 9.

Шаг 6. Проверяем выполнение мягких (вероятностных) ограничений

$$\Pr\left\{ g_j(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi) \le 0 \right\} \ge \rho_j\,, \quad j \in J_1\,. \tag{19}$$

Если условия (18), (19) выполняются, то решение для заданного типа аппаратурного оформления найдено $a^{(\mu)}$, $d^{(\mu)} = d^{(\nu)}$, $z^{(\mu)} = z^{(\nu)}$ и переходим к шагу 7.

Если условие (18) выполняется, а условие (19) не выполняется, то переходим к шагу 8.

Шаг 7. Проверяем выполнение условия «Множество альтернативных типов аппаратурного оформления ТС исчерпано?», то есть $\mu \ge \mu_{\text{зад}}$. Если «Да», то получаем окончательное решение $a^* = a^{(\mu)}$, $d^* = d^{(\mu)}$, $z^* = z^{(\mu)}$, $i \in I^{(\nu)}$, *и алгоритм заканчивает свою работу*. В противном случае переходим к альтернативному типу аппаратурного оформления, то есть увеличиваем число μ на единицу и переходим к шагу 2.

Шаг 8. Вычисляем

$$\chi_2(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}) = \max_{\xi \in \Xi} \max_{j \in J_2} \bar{g}_j\left(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}, \xi\right), \tag{20}$$

с использованием алгоритма внешней аппроксимации [6]. Обозначим через $\bar{\bar{\xi}}^{(\nu)}$ решение задачи (20) и дополним точкой $\bar{\bar{\xi}}^{(\nu)}$ множество точек $S_2^{(\nu)}$, в которых нарушаются мягкие ограничения (19), то есть $S_2^{(\nu)} = S_2^{(\nu-1)} \cup \bar{\bar{\xi}}^{(\nu)}$, $I_2^{(\nu)} = I_2^{(\nu-1)} \cup (n+1)$, $p = B_2$ и увеличиваем число критических точек n на 1, $n = n+1$.

Шаг 9. Если $p = B_1$, то переобозначим множества $S_2^{(\nu-1)}$, $I_2^{(\nu-1)}$, то есть $S_2^{(\nu)} = S_2^{(\nu-1)}, I_2^{(\nu)} = I_2^{(\nu-1)}$, если $p = B_2$, то $S_1^{(\nu)} = S_1^{(\nu-1)}, I_1^{(\nu)} = I_1^{(\nu-1)}$. Сформируем множества $S^{(\nu)} = S_0 \cup S_1^{(\nu)} \cup S_2^{(\nu)}$, $I^{(\nu)} = I_0 \cup I_1^{(\nu)} \cup I_2^{(\nu)}$, присвоим числу итераций ν значение $\nu+1$ и переходим к шагу 3.

Дадим некоторые пояснения алгоритму.

На шаге 6 неравенство $\chi_2\left(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}\right) \le 0$ означает, что мягкие ограничения выполняются с вероятностью 1. Поэтому, если не выполняется условие (19), то заведомо не выполняется условие $\chi_2\left(a^{(\mu)}, d^{(\nu)}, z^{(\nu)}\right) \le 0$ и, следовательно, получаем точку $\bar{\bar{\xi}}^{(k)}$, в которой нарушаются мягкие ограничения.

Предположим, что решена одноэтапная задача оптимизации (8), (11), (12) и получено решение $\left[a^*, d^*, z^*\right]$. В этом случае для его реализации необходимо обеспечить выполнение условий $a = a^*, d = d^*, z = z^*$ при изготовлении, монтаже и функционировании ТС.

Из вышесказанного следует, что задачи оптимизации первого блока при проектировании химико-технологических процессов и САУ формулируются в форме задач нелинейного программирования с ограничениями типа равенств и неравенств. Исследования показали, что в случае многих переменных квадратичная аппроксимация (например используемая в методе Ньютона) обычно дает хорошие оценки точек безусловного минимума. Более того, группа квазиньютоновских методов позволяет пользоваться преимуществами квадратичной аппроксимации, не строя в явном виде полную аппроксимирующую функцию второго порядка на каждой итерации. Квазиньютоновские методы способны ускорить вычислительный процесс при использовании их в рамках процедур определений направлений поиска для методов приведенного градиента и его проекций.

Недостатком постановок одноэтапных задач оптимизации аппаратов и систем пищевой и химической технологии является то, что при определении оптимального режима z^* их функционирования на этапе проектирования не учитывается возможность уточнения векторов ξ и, соответственно, z при эксплуатации технологических аппаратов и систем. Такую возможность предоставляют постановки двухэтапных задач оптимизации [2, 3, 6].

Заключение

Одним из существенных результатов данной статьи является разработка нового подхода к выбору автоматизированного комплекса «ТС – САС» путем: 1) выбора структуры САС с использованием множеств регулируемых (наблюдаемых) переменных и допустимых управляющих воздействий (с учетом наблюдаемости выходных переменных ТС и оценки затрат на разработку необходимых датчиков и приборов автоматического контроля, возможности и точности прогноза выходных переменных по косвенным показателям, управляемости ТС с той или иной комбинацией управляющих воздействий; исследования динамических свойств каналов управления (показателей инерционности и регулируемости объекта управления)); 2) постановки и решения одноэтапных задач оптимизации конструктивных и режимных (заданий регуляторам САС) переменных ТС пищевых и химических технологий по критерию приведенных затрат на создание комплекса.

В общем случае можно говорить о задаче выбора оптимального автоматизированного комплекса «ТС – САУ», обеспечивающего наилучшие значения целевой функции эффективности его функционирования в условиях интервальной неопределенности части параметров сырья, технологических переменных и коэффициентов математической модели ТС.

Список литературы

1. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1985. – 448 с.

2. Островский, Г. М. Оптимизация технических систем / Г. М. Островский, Н. Н. Зиятдинов, Т. В. Лаптева. – М. : КНОРУС, 2012. – 421 с.

3. 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.

4. Девятов, Б. Н. Теория переходных процессов в технологических аппаратах с точки зрения задач управления / Б. Н. Девятов. – Новосибирск : Ред.-изд. отд. Сиб. отд-ния АН СССР, 1964. – 323 с.

5. Halemane, K. R. Optimal Process Design under Uncertainty / K. R. Halemane, I. E. Grossmann // AIChE Journal. – 1983. – Vol. 29. – P. 425 – 433.

6. Островский, Г. М. Технические системы в условиях неопределенности: анализ гибкости и оптимизации / Г. М. Островский, Ю. М. Волин. – М. : БИНОМ, Лаборатория знаний, 2008. – 319 с.

7. Дьяконов, С. Г. Теоретические основы проектирования промышленных аппаратов химической технологии на базе сопряженного физического и математического моделирования / С. Г. Дьяконов, В. В. Елизаров, В. И. Елизаров. – Казань : Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. – 456 с.

8. Bodrov, V. I. Strategy of Synthesis of Flexible Automatic Chemical Technological Systems / V. I. Bodrov, S. I. Dvoretskij // Теорет. основы хим. технологии. – 1991. – Т. 25, № 5. – С. 716 – 730.

9. Бодров, В. И. Оптимальное проектирование энерго- и ресурсосберегающих процессов и аппаратов химической технологии / В. И. Бодров, С. И. Дворецкий, Д. С. Дворецкий // Теорет. основы хим. технологии. – 1997. – Т. 31, № 5. – С. 542 – 548.

10. Калман, Р. Очерки по математической теории систем / Р. Калман, П. Фалб, М. Арбиб. – М. : Мир, 1971. – 400 с.

11. Shields, R.W. Structural Controllability of Multinput Systems / R. W. Shields, J. B. Pearson // IEEE Trans. Autom. Contr. – 1976. – Vol. AC–21. – P. 203.

12. Новые подходы к интегрированному синтезу гибких автоматизированных химико-технологических систем / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, С. В. Мищенко, Г. М. Островский // Теорет. основы хим. технологии. – 2010. – Т. 44, № 1. – С. 69 – 77.

13. Крамер, Г. Математические методы статистики : пер. с англ. / Г. Крамер. – М. : НИЦ «Регуляр. и хаот. динамика», 2003. – 648 с.

Design of Controlled Processes and Devices of Food and Chemical Technologies under Uncertainty. Part 1. One Stage Problems and Algorithms of Integrated Design

D. S. Dvoretskiy[1], S. I. Dvoretskiy[1], G. M. Ostrovskiy[2]

Department "Technology and Equipment of Food and Chemical Industries", TSTU (1); topt@topt.tstu.ru;
OAO "Karpov Institute of Physical Chemistry", Moscow (2)

Key words and phrases: adjustability; automatic stabilization system; controllability; design; engineering process; apparatus; flexibility function; food and chemical engineering; inertance; one-stage optimization problem; static optimization.

Abstract: Methodology for the design of flexible (workable) engineering processes and apparatus of food and chemical industry, with the prerequisites for efficient control and automation, has been proposed, and a multi-stage iterative procedure of solving problems of integrated design of flexible automated engineering (or technical) systems of food and chemical industry has been formalized. A technique for the computation of design and mode variables (optimal tasks for automatic stabilization system regulators) of chemical and food engineering system equipment is developed, to allow optimal functioning of engineering processes, apparatus and systems in food and chemical industries.

References

1. Kafarov V.V. *Metody kibernetiki v khimii i khimicheskoi tekhnologii* (Methods of Cybernetics in Chemistry and Chemical Technology), Moscow: Khimiya, 1985, 448 p.
2. Ostrovskii G.M., Ziyatdinov N.N., Lapteva T.V. *Optimizatsiya tekhnicheskikh sistem* (Optimization of technical systems), Moscow: KNORUS, 2012, 421 p.
3. Dvoretskii D.S., Dvoretskii S.I., Ostrovskii G.M. *Novye podkhody k proektirovaniyu khimiko-tekhnologicheskikh protsessov, apparatov i sistem v usloviyakh interval'noi neopredelennosti* (New approaches to the design of chemical processes, devices and systems under interval uncertainty), Moscow: Spektr, 2012, 344 p.
4. Devyatov B.N. *Teoriya perekhodnykh protsessov v tekhnologicheskikh appara-takh s tochki zreniya zadach upravleniya* (Theory of transient processes in technological devices in terms of management tasks), Novosibirsk, 1964, 323 p.
5. Halemane K.R., Grossmann I.E. *AIChE Journal*, 1983, vol. 29, pp. 425-433.
6. Ostrovskii G.M., Volin Yu.M. *Tekhnicheskie sistemy v usloviyakh neopredelennosti: analiz gibkosti i optimizatsii* (Technical systems under uncertainty: flexibility analysis and optimization), Moscow: BINOM, Laboratoriya znanii, 2008, 319 p.
7. D'yakonov S.G. Elizarov V.V., Elizarov V.I. *Teoreticheskie osnovy proektiro-vaniya promyshlennykh apparatov khimicheskoi tekhnologii na baze sopryazhennogo fizicheskogo i matematicheskogo modelirovaniya* (Theoretical bases of designing industrial chemical technology devices based on the dual physical and mathematical modeling), Kazan': Izdatel'stvo KGTU, 2009, 456 p.
8. Bodrov V.I, Dvoretskij S.I. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii*, 1991, vol. 25, no. 5, pp. 716-730.
9. Bodrov V.I., Dvoretskii S.I., Dvoretskii D.S. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 1997, vol. 31, no. 5, pp. 494-499.
10. Kalman R.E., Falb P.L., Arbib M.A. *Topics in mathematical system theory*, New York: McGraw-Hill, 1969.
11. Shields R.W., Pearson J.B. *IEEE Trans. Autom. Contr*, 1976, vol. AC–21, pp. 203.
12. Dvoretsky D.S., Dvoretsky S.I., Mishchenko S.V., Ostrovsky G.M. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2010, vol. 44, no. 1, pp. 67-75.
13. Cramér H. *Mathematical Methods of Statistics*, NJ, Princeton: Princeton University Press, 1946.

Projektierung der gesteuerten Prozesse und der Apparate der Nahrungs- und chemischen Technologien unter den Bedingungen der Unbestimmtheit. Teil 1. Einstufige Aufgaben und Algorithmen der integrierten Projektierung

Zusammenfassung: Es sind die Methodologie der Projektierung der flexibelen (arbeitsfähigen) technologischen Prozesse und der Apparate der chemischen und Nahrungstechnologien, die die Vorbedingungen der wirksamen Verwaltung und der Automatisierung bilden angeboten, und die Formalisierung der iterativen Prozedur der Lösung der Aufgaben der integrierten Projektierung flexibel automatisiert technologisch (oder technisch) der Systeme der Nahrungs- und chemischen Produktionen. Es ist die Methodik der Berechnung der konstruktiven Parameter und regime-variabel (der optimalen Aufgaben den Reglern des Systems der automatischen Stabilisierung) der Erledigung der technischen Systeme der Nahrungs- und chemischen Technologien, bei entwickelt. Und der Qualität der ausgegebenen Produktion und das sichere Funktionieren der technologischen Prozesse, der Apparate und der Systeme der Nahrungs- und chemischen Technologien.

Conception des processus commandés et des appareils des technologies alimentaires et chimiques dans les conditions de l'indétermination et algorithmes de la conception intégrée . 1-ère partie. Problème à une étape et algorithmes de la conception intégrée

Résumé: Sont proposées la méthodologie de la conception des processus technologies flexible (capable de fonctionner) et des appareils des technologies alimentaires et chimiques formant les conditions de la commande efficace et de l'automatisation et la formalisation de la procédure à plusieures étapes de la solution du problème de la conception intégrée de l'automatisation des systèmes technologiques (ou techniques) des industries alimentaires et chimiques. Est élaborée la méthode du calcul des paramètres constructifs et des grandeurs variables de régime (des instructions optimales pour les régulateurs du système de la stabilisation automatique) de la présentation des systèmes techniques des technologies alimentaires et chimiques lors desquelles est assuré le fonctionnement optimal (dans le sens de l'économie de l'énergie et des ressources ainsi que de la qualité des produits) et sûr des processus technologiques et des systèmes des technologies alimentaires et chimiques.

Авторы: ***Дворецкий Дмитрий Станиславович*** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»; ***Дворецкий Станислав Иванович*** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», и. о. ректора, ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; ***Островский Геннадий Маркович*** – старший научный сотрудник, ОАО «Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский физико-химический институт имени Л. Я. Карпова», г. Москва.

Рецензент: ***Гатапова Наталья Цибиковна*** – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
