

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

OPTIMIZATION OF THE PROCESS MANAGEMENT STRATEGY IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY

S. Tyryshkin

Summary. With the development of digitalisation, the Fourth Industrial Revolution, process control systems have reached a new level, offering higher levels of accuracy, flexibility and automation that were unimaginable in the past. However, with the advent of innovation, breakthrough solutions, and increasing complexity of industrial systems, the range of sources of uncertainty that can affect process performance, stability, and reliability has expanded significantly. Uncertainties can arise from modelling errors, parameter variations, external disturbances, measurement noise and nonlinearities. In this context, the need to optimise the control strategy of technological processes under uncertainty is relevant, and the use of new approaches and methods for handling random perturbations is of particular importance. The article describes an approach to optimisation of control strategy based on fuzzy logic, which allows to combine different control objectives, and to provide realistic and robustness with respect to input and output constraints.

Keywords: management, uncertainty, strategy, fuzzy logic, optimisation, modelling.

Тырышкин Сергей Юрьевич

кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул
service.vip-spe@yandex.ru

Аннотация. С развитием цифровизации, Четвертой промышленной революции системы управления технологическими процессами вышли на новый этап, предлагая более высокий уровень точности, гибкости и автоматизации, который был невообразим в прошлом. Однако с появлением инноваций, прорывных решений и усложнением промышленных систем значительно расширился спектр источников неопределенности, которые могут повлиять на производительность, стабильность и надежность технологических процессов. Неопределенности могут возникать из-за ошибок моделирования, вариаций параметров, внешних возмущений, шумов измерений и нелинейностей. В данном контексте актуальной является необходимость оптимизации стратегии управления технологическими процессами в условиях неопределенности, также особую значимость приобретает использование новых подходов и методов обработки случайных возмущений. В статье описан подход к оптимизации стратегии управления, основанный на нечеткой логике, который позволяет объединить разные цели управления, и обеспечить реалистичность и устойчивость контроля по отношению к входным и выходным ограничениям.

Ключевые слова: управление, неопределенность, стратегия, нечеткая логика, оптимизация, моделирование.

Значительная часть современных предприятий, на которых стремительными темпами внедряются достижения Четвертой промышленной революции, инновационные технологии и прорывные решения становятся комплексными, высокотехнологичными системами. Отличительной особенностью этих систем является влияние внешних и внутренних факторов, определяющих их технологические и энергетические потоки. Эти непредсказуемые эффекты создают условия неопределенности и наделяют процессы функционирования стохастическими признаками. Неопределенность влияет на все этапы жизненного цикла технических систем, от проектирования и производства до их использования, даже за пределами фазовых границ [1].

Важность управления процессами в промышленных системах невозможно переоценить. Это основа любой операции, гарантирующая бесперебойность и эффективность ее осуществления. Поддерживая переменные процесса в желаемом диапазоне, управленческое воздействие помогает минимизировать отходы, сократить

время простоя и улучшить качество продукции. Как правило, неопределенность в контурах управления технологическими процессами возникает из-за недостатка знаний о самой системе или среде, в которой она функционирует. Это может быть вызвано: недетерминированной связью между входными и выходными переменными системы, слишком сложным представлением самой системы и неожиданными изменениями характеристик системы из-за сбоев или изменяющихся во времени свойств. Кроме того, неопределенности возникают из-за непредсказуемой и мгновенной изменчивости различных условий технологического процесса, таких как температура и давление в соединенных рабочих установках, скорость (рециркуляционного) потока и/или его состав, или из-за определенных параметров модели, таких как кинетические константы или параметры равновесия [2]. Эти неопределенности или возмущения часто представляют собой многомерные и коррелированные стохастические последовательности, которые оказывают цепное воздействие на каждую операцию производственной линии.

В связи с тем, что в большинстве случаев источники неопределенности достаточно проблематично формализовать с физической точки зрения, в литературе предлагается несколько подходов, которые позволяют обрабатывать неопределенности при управлении технологическими процессами с помощью различных методов и инструментов. Так, например, в десятках различных областей появляются новые инструменты и перспективы для реализации управленческого влияния в условиях, характеризующихся высокой изменчивостью. Это может быть бережливым запуском, дизайн-мышлением или гибкой разработкой, которые революционизируют способы контроля за технологическими системами. Также свое применение на практике находят методы классического управления, оптимального управления и робастного управления. Достаточно часто можно встретить ситуацию, когда в промышленной практике неопределенности обычно компенсируются с помощью консервативных решений, таких как перепроектирование технологического оборудования с последующей модернизацией для преодоления узких мест в работе, или переоценка рабочих параметров, вызванная предположениями о наихудшем уровне неопределенных параметров, что приводит к значительному ухудшению объективной функции в задаче оптимизации [3].

Не подлежит сомнению тот факт, что для количественного понимания и управления изменяющимися во времени явлениями в технологических системах необходимо связать наблюдаемое динамическое поведение с математическими моделями. Эти модели обычно зависят от ряда параметров, значения которых неизвестны или известны лишь приблизительно. Кроме того, часто можно измерить только часть динамики системы. Поэтому математическая модель неизбежно характеризуется параметрической или функциональной неопределенностью. Неопределенность модели также вполне ожидаема при идентификации очень сложных систем. Это связано не только с неопределенностью, возникающей в результате оценки параметров или функций, а касается также структуры и сложности модели, соответствующего выбора функции стоимости, которая обеспечивает базовую основу для оптимизации параметров управления [4, 5].

Отмеченные обстоятельства позволяют утверждать, что выбор стратегии управления технологическими процессами является актуальной задачей, решение которой может варьироваться от простых контуров обратной связи до сложных алгоритмов, включающих предиктивные модели и искусственный интеллект. Поэтому необходимость интенсификации дальнейших исследований в данном направлении послужило стимулом для выбора темы статьи.

Сложности управления технологическими процессами в промышленных системах, включая динамику

процесса, стратегии управления и различные задействованные компоненты освещают в своих трудах Дворецкий С.И., Акулинин Е.И., Шерстнев В.С., Яковис Л.М., Степанов П.С., Стронгин П.Я., Weifeng Xu, Chang Liu, Garima Malik, Piyush Sharma, Russel Kingshott, Tak Yan.

Особенности организации наблюдения за технологическим процессом и проведения мониторинга его качества в режиме онлайн с использованием контрольных карт изучают Утепбергенов И.Т., Сейдазимов С.Б., Бочкарев П.Ю., Митин С.Г., Назарьев А.В., Гумаров Г.С., Victoria Muerza, Emilio Larrodé, José María Moreno-Jiménez, Beatriz Royo.

Над разработкой многороботической системы управления сложными производственными процессами, которая имитирует основные операции, и проверкой ее устойчивости к различным неопределенностям, трудятся Каландаров П.И., Ядгарова Д.Б., Пряхин В.Н., Карапетян М.А., Мочунова Н.А., Kittisak Wongmahesak, Navaporn Wongsuwan, Bulent Akkaya, Maria Palazzo.

В тоже время несмотря на то, что сегодня разработаны и широко используются различные подходы к обработке неопределенности, которые различаются по целям, и могут включать гибкость, рентабельность и/или устойчивость процесса, ряд вопросов требует дополнительной проработки, особенно с учетом автоматизации и цифровизации производственных цепочек. Так, отдельного внимания заслуживает усовершенствование систематического подхода к решению задач оптимизации и управления технологическими процессами с учетом случайных ограничений. Кроме того, в уточнении нуждаются стратегии управления производственными системами на основе определения полуактивных и активных процессов.

Таким образом, цель статьи заключается в рассмотрении направлений оптимизации стратегии управления технологическими процессами в условиях неопределенности.

Исторически сложилось так, что управление технологическими процессами в непредвиденных, слабо прогнозируемых обстоятельствах было направлено, в первую очередь, на снижение затрат и повышение эффективности. Традиционные подходы к управлению часто опирались на реактивные меры, решая проблемы только после их проявления [6]. Такая реактивная позиция перестает быть достаточной перед лицом появляющихся каждый день технологических новинок, существенным образом усложняющих производственные процессы. Если не учитывать эти тенденции и сдвиги, то их игнорирование способно привести к значительным сбоям в работе, что подчеркивает необходимость разработки более проактивных и устойчивых стратегий управления. В данном контексте необходимо отметить, что не-

давние достижения в таких областях, как искусственный интеллект, машинное обучение, Интернет вещей и аналитика больших данных произвели революцию в возможностях управления и мониторинга технологическими процессами. Что касается автоматических контуров управления, то в данном случае нечеткая логика также стала мощным инструментом благодаря возможности обрабатывать сложные нелинейные процессы и неопределенность данных.

Чтобы рассмотреть возможности и перспективы приложения отмеченных выше технологий для оптимизации и повышения эффективности стратегий управления технологическими процессами, представляется целесообразным, прежде всего, формализовать причинно-следственную диаграмму влияния источников неопределенности на эти процессы (см. рис. 1).

На следующем этапе исследования рассмотрим более подробно математическую формализацию поставленной задачи.

Предположим, что технологический процесс является N -этапной нечеткой системой, которая может быть описана следующим нечетким уравнением:

$$X_{i+1} = \tilde{f}(X_i, u_i), i = 0, 1, \dots, N - 1$$

где « $\sim$ » оператор нечеткости.

$$X_i = \{(x_i, m_i(x_i))\}, x_i \in X, u_i \in U$$

где X, U — области изменения состояния и управления соответственно;

$m_i(x_i)$ — функция принадлежности нечеткого множества X_i .

Допустим, что на контур управления u_i наложены нечеткие ограничения:

$$C_i = \{(u_i, \mu_i(u_i))\}$$



Рис. 1. Причинно-следственная диаграмма влияния источников неопределенности на эффективность управления технологическими процессами

где $\mu_i(u_i)$ — функция принадлежности нечеткого множества C_i .

Пусть задано начальное состояние технологического процесса — X_0 . Необходимо найти последовательность четких управлений u_i ($i=0, \dots, N-1$), которые будут удовлетворять нечетким ограничениям C_i , и последовательность нечетких состояний $X_1, \dots, X_N$ для которых показатель качества G принимает максимальное значение.

Далее предлагаем привести данную задачу к формату многоэтапного принятия решений. Для определения прогнозируемого максимального значения G представляется целесообразным использовать экспертную оценку. В таком случае выразим цель в виде нечеткого множества G_N в X с функцией принадлежности $M_N(X_N)$. Руководствуясь принципом Беллмана-Заде решение поставленной задачи может быть записано в следующем виде:

$$D = C_0 \cap C_1 \cap \dots \cap C_{N-1} \cap G_N$$

Для соответствующих функций принадлежности имеем:

$$\begin{aligned} \mu_D(u_0, \dots, u_{N-1}) &= \\ &= \mu_0(u_0) \wedge \mu_1(u_1) \wedge \dots \wedge \mu_{N-1}(u_{N-1}) \wedge M_N(X_N) \end{aligned}$$

где $\wedge$ — знак операции $\min$.

Общая задача управления технологическими процессами в условиях неопределенности может быть сформулирована следующим образом:

$$\min E[f(x, u, \xi)] + wD[f(x, u, \xi)]$$

$$g(\dot{x}, x, u, \xi) = 0, x(t_0) = x_0$$

$$Pr\{h(\dot{x}, x, u, \xi) \geq 0\} \geq \alpha$$

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, t_0 \leq u \leq u_{\max}, t_0 \leq t \leq t_f$$

где f — объективная функция;

E и D — операторы ожидания и вариации, соответственно;

w — весовой коэффициент между двумя условиями;

x , u и ξ — векторы состояния, решений и случайных величин соответственно, g — ограничения равенства (т.е. уравнения модели).

Надежность или вероятность соблюдения ограничений неравенства задается $Pr\{h(\dot{x}, x, u, \xi) \geq 0\} \geq \alpha$. Величина α ($0 \leq \alpha \leq 1$) представляет собой уровень веро-

ятности. Поскольку α задается непосредственно пользователем, можно выбирать различные уровни и находить компромисс между значением объективной функции и риском нарушения ограничений [7]. Предлагаемый подход основан на формулировке выходных ограничений как ограничений вероятности, которые могут быть сформулированы в двух различных формах: ограничение единственной вероятности, где будут иметь место индивидуальные вероятности обеспечения каждого неравенства. В этой форме различным выходам могут быть присвоены различные уровни доверия в зависимости от их характеристик. Другая форма — совместное ограничение шансов, когда все неравенства включаются в вычисление вероятности, то есть они должны быть выполнены одновременно с единственным заданным уровнем доверия (вероятности).

Гауссовское предварительное распределение управляющего сигнала, обозначено как $p(u(k)|y_d(k+d), y(k))$, где $y_d(k+d)$ — желаемый выход системы, в свою очередь, апостериорное распределение вероятности управляющего сигнала $p(u(k)|y(k+d), y_d(k+d), y(k))$, по правилу Байеса будет выглядеть следующим образом:

$$p(u(k)|y(k+d), y_d(k+d), y(k)) =$$

$$\frac{p(y(k+d)|u(k), y(k))p(u(k)|y_d(k+d), y(k))}{p(y(k+d)|y(k))}$$

Оптимальная стратегия управления $u^{opt}(k)$ определяется путем минимизации отрицательного логарифмического последствия относительно $u(k)$:

$$-\log p(u(k)|y(k+d), y_d(k+d), y(k)) \propto$$

$$\frac{1}{2} [y(k+d) - \bar{f}(y(k), u(k))]^2$$

$$R^{-1} [y(k+d) - \bar{f}(y(k), u(k))]^2$$

$$+ \frac{1}{2} [u(k) - \hat{u}(k)]^T \hat{P}^{-1} [u(k) - \hat{u}(k)]$$

$$- \frac{1}{2} [y(k+d) - \hat{y}(k+d)]^T Q^{-1} [y(k+d) - \hat{y}(k+d)]$$

где $\hat{P}^{-1}$ — ковариационная матрица предшествующего распределения управляющих сигналов;

$\hat{u}(k)$ — среднее значение предшествующего распределения, равное оценочному значению управляющего сигнала;

$\hat{y}(k+d)$ — наилучшее предсказание выхода системы с учетом оценки управляющего сигнала;

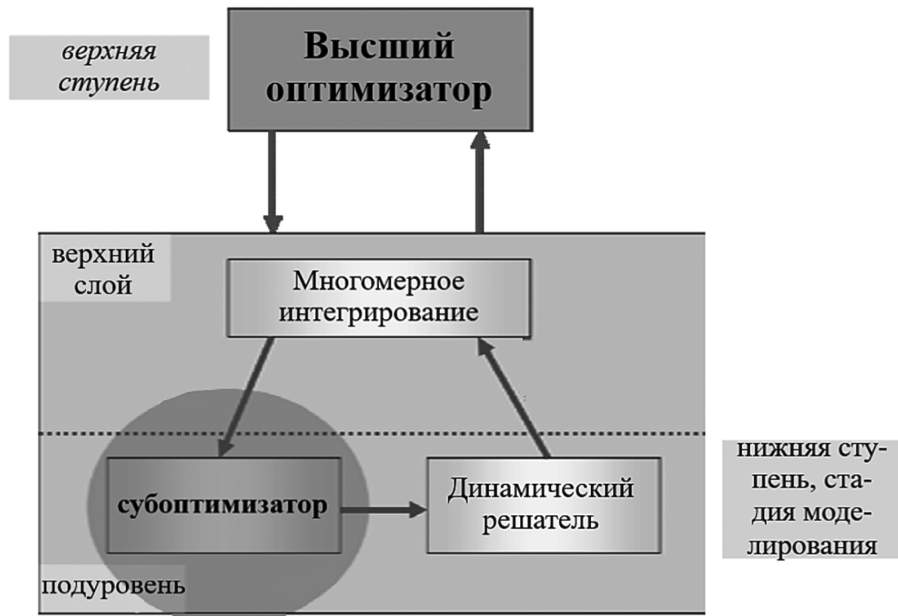


Рис. 2. Система оптимизации с ограничением шансов

Q^{-1} — ковариационная матрица доказательств, $p(u(k+d)|y(k+d)|y(k))$.

Отдельный акцент необходимо сделать на том, что на практике достаточно часто встречаются задачи стохастической оптимизации, в которых не может быть обеспечена монотонная связь между ограниченным выходом и любой неопределенной входной переменной. Это особенно актуально для тех технологических систем, где переменные решения сильно критичны к вопросу о том, существует ли монотонность или нет [8]. В данном случае целесообразно использовать новый эффективный подход к программированию с ограничениями на случайность для оптимизации и управления процессами в условиях неопределенности без гарантии монотонной связи между ограниченным выходом и неопределенным входом.

Этот подход использует двухэтапную схему вычислений для декомпозиции задачи (см. рис. 2).

Верхний этап представляет собой высший оптимизатор, следующий последовательной стратегии, который генерирует значения переменных стратегического решения и передает их на нижний этап (этап моделиро-

вания). На этом этапе значения объективной функции, детерминированных и вероятностных ограничений, а также градиенты возвращаются к вышестоящему оптимизатору. Кроме того, внутри слоя моделирования существует двухслойная структура для вычисления случайных ограничений. Один из них — вышестоящий слой, где вероятности и их градиенты вычисляются путем многомерного интегрирования. Структура нижнего слоя является ключом к вычислению ограничений шанса с немонотонной зависимостью [9].

Таким образом, резюмируя полученные результаты, отметим, что современные производства и технологические процессы, их состояния зависят от многих факторов, прямо или косвенно оказывающих на них влияние, что создает условия неопределенности в окружающей среде. Соответственно задача контроля за этими процессами существенно усложняется, что обуславливает необходимость применения интеллектуальных алгоритмов и методов в контуре управления. В статье описан подход к оптимизации стратегии управления, основанный на нечеткой логике, который позволяет объединить разные цели управления технологическими процессами, и обеспечить их реалистичность и устойчивость по отношению к входным и выходным ограничениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джамбеков А.М. Управление непрерывными технологическими процессами в условиях неопределенности // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. № 3 (17). С. 84–93
2. Weifeng Xu, Chang Liu External environment uncertainty, key resources acquisition, and corporate technological innovation // Managerial and Decision Economics. 2025. Volume 45, Issue 1. P. 34–41.
3. Shulei Zhang, Runda Jia A chance-constrained tube-based model predictive control for tracking linear systems using data-driven uncertainty sets // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2023. Volume 34, Issue 2. P. 98–108.
4. Дворецкий С.И. Постановки задач оптимизации при интегрированном проектировании технологических процессов, аппаратов и систем управления в условиях неопределенности // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2024. Т. 30. № 2. С. 184–195.
5. Тырышкин С.Ю. Параллельное компактное моделирование квантовых схем // Современные наукоемкие технологии. — 2025. — №1. — С. 185–191.
6. Chuiliu Kong, Ying Wang Adaptive tracking control under quantized observations and observation uncertainty with unbounded variance // Asian Journal of Control. 2023. Volume 26, Issue 2. P. 12–19.
7. Шерстнев В.С. Повышение качества регулирования систем управления при нечеткой исходной информации // Вестник университета Шакарима. Серия технические науки. 2024. № 1 (13). С. 5–10.
8. Яковис Л.М., Степанов П.С., Стронгин П.Я. Декомпозиция задачи робастной настройки типовых регуляторов при управлении многомерными динамическими объектами в условиях интервальной неопределенности // Математические методы в технологиях и технике. 2024. № 8. С. 17–22.
9. Fei Li, Chao Wu Tube-based stochastic model predictive control leveraging Gaussian process regression for linear systems with bounded additive uncertainties // Asian Journal of Control. 2025. № 56. P. 107–110.

© Тырышкин Сергей Юрьевич (service.vip-spe@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»