

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ АЛГОРИТМОВ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛЬЮ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Черешко, М.М. Шундерюк

Аннотация. Отмечено, что усовершенствованное управление технологическими процессами (ТП) включает в себя широкий спектр математических методов и программно-алгоритмических средств, применение которых позволяет повысить рентабельность производства благодаря более эффективной компенсации внешних воздействий на ТП, автоматическому подбору и поддержанию оптимального режима. Указано, что управление многосвязными объектами на основе прогнозирующей модели ТП — магистральное направление усовершенствованного управления на протяжении последних 30-ти лет. Исследована робастность алгоритмов с прогнозирующей моделью по отношению к точности принятой модели. Под «робастностью» понимается возможность достижения цели управления в условиях неопределенности. Сформирован критерий применимости управления, позволяющий судить о правильности работы алгоритма управления. В выполненном исследовании модель задана в виде передаточной функции линейного объекта с запаздыванием. Определены граничные условия для параметров передаточной функции, нарушение которых приводит к дестабилизации объекта управления либо недостаточно быстрому достижению цели управления. Приведены результаты численного расчета трехмерных областей параметров модели, внутри которых обеспечивается выполнение критерия применимости управления. Даны границы актуальности полученных результатов.

Ключевые слова: усовершенствованное управление технологическим процессом, управление на основе прогнозирующей модели, робастность алгоритма усовершенствованного управления, прогнозирующая модель, передаточная функция линейного объекта, устойчивость объекта управления, критерий применимости управления, область робастности.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних 25 лет усовершенствованное управление (УУ) технологическими процессами (в мировой практике принят термин APC — Advanced Process Control) является одним из ведущих направлений промышленной автоматизации. Число успешных внедрений систем усовершенствованного управления технологическими процессами (СУУТП) в России приближается к 100 и интерес к таким системам продолжает расти. Основная область применения СУУТП — нефтепереработка, но успешные внедрения имеются и в нефтехимии, производстве удобрений, обогащении полезных ископаемых. Об успешных внедрениях СУУТП можно узнать из работ [1, 2].

Усовершенствованное управление охватывает множество методов и подходов, основанных на достижениях современной математической теории управления. Наибольшее практическое распространение получили алгоритмы УУ на основе прогнозирующей модели технологическими процессами (Model Predictive Control — MPC) [3–6]. Поэтому далее под термином УУ будет подразумеваться именно это направление.

Прогнозирующая модель технологического процесса (ТП) в алгоритмах УУ необходима для предсказания поведения ТП в будущем. На каждом временном такте СУУТП прогнозирует поведение ТП и вырабатывает необходимые корректирующие воздействия на ТП. Прогнозирующая модель реализована в СУУТП в виде модельной матрицы,

описывающей динамические характеристики ТП. Элементами модельной матрицы могут быть, например, передаточные функции, описывающие зависимости между управляющими и контролируемыми переменными СУУТП. Управляющие переменные (MV — от англ. *manipulated variables*) — это параметры ТП, которыми манипулирует СУУТП для поддержания контролируемых переменных (CV — от англ. *controlled variables*) в заданных диапазонах или на заданных значениях (уставках). Для идентификации параметров передаточных функций разработчик СУУТП применяет математические методы, основанные на статистической обработке данных, полученных в ходе испытаний, реакций ТП на ступенчатые воздействия (так называемого пошагового тестирования).

Нередко при идентификации параметров прогнозирующей модели разработчик СУУТП не может определить точное значение того или иного коэффициента передаточной функции — ему доступен только интервал, в пределах которого лежит «истинное» значение. Неопределенность значений коэффициентов может быть вызвана несколькими факторами. К примеру, на ТП воздействуют ненаблюдаемые возмущения, такие, как изменения погодных условий, состава сырья, теплотворной способности топлива и т. п. Динамические характеристики ТП могут изменяться в зависимости от технологического режима. Имеют место и погрешности измерений. Поэтому разработчик для определения значений коэффициентов передаточных функций, пригодных для использования в СУУТП, прибегает к усреднению нескольких полученных результатов. В ходе опытной эксплуатации СУУТП значения коэффициентов передаточных функций при необходимости корректируются.

Важное свойство алгоритма УУ с прогнозирующей моделью состоит в его робастности. Под робастностью алгоритма подразумевается достижение цели управления при неточной прогнозирующей модели ТП. В настоящей работе формулируется критерий применимости управления, выполнение которого гарантирует, с одной стороны, устойчивость управления, а с другой — достаточно высокую скорость достижения цели управления. Определяется область робастности УУ, т. е. максимально допустимое расхождение прогнозирующей модели и модели ТП, при котором выполняется критерий применимости. Даются рекомендации по построению прогнозирующей модели ТП, в частности, по уменьшению неопределенности выбора коэффициентов передаточной функции внутри доверительного интервала, полученного при идентификации модели.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим задачу УУ в следующей постановке. Математическая модель ТП (объекта управления) задается в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений вида

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t)), \quad x(0) = x_0,$$

где x — вектор состояний размерности n , а u — вектор управления размерности m . На компоненты векторов состояний и управления могут быть наложены ограничивающие условия, например, в виде

$$x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}, \quad i = 1, \dots, n,$$

$$u_{j\min} \leq u_j \leq u_{j\max}, \quad j = 1, \dots, m.$$

Будем считать, что цель управления заключается в обеспечении равенства

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - r_x(t)\| = 0.$$

Здесь заданная векторная функция $r_x(t)$ определяет желаемую динамику объекта. Качество управления при этом будет оцениваться посредством целевой функции $J(x(t), u(t))$, заданной на управляемых траекториях движения объекта. Задача оптимального управления — достичь минимума функционала J при соблюдении всех требуемых ограничений.

Для решения задачи УУ применяется прогнозирующая модель ТП. В СУУТП она имеет вид модельной матрицы, элементами которой являются передаточные функции. В нашем случае передаточные функции описывают зависимости между управляющими (MV) и контролируемыми (CV) переменными. Пример модельной матрицы размерности 3×3 представлен на рис. 1.

Алгоритм УУ включает в себя следующие основные действия.

1. Оценивание вектора состояния $x(t)$ реального объекта.

2. Решение оптимизационной задачи $J(x(t), u_{\text{пр}}(t), T_p, T_c) \rightarrow \min$, где T_p — горизонт прогнозирования, T_c — горизонт управления, $u_{\text{пр}}$ — прогнозируемое управление.

3. Применение найденного оптимального управления в качестве программного на отрезке $t \in [t, t + \delta]$, где δ — интервал дискретизации системы.

4. Замена времени t на $t + \delta$ и повторение операций 1—3.

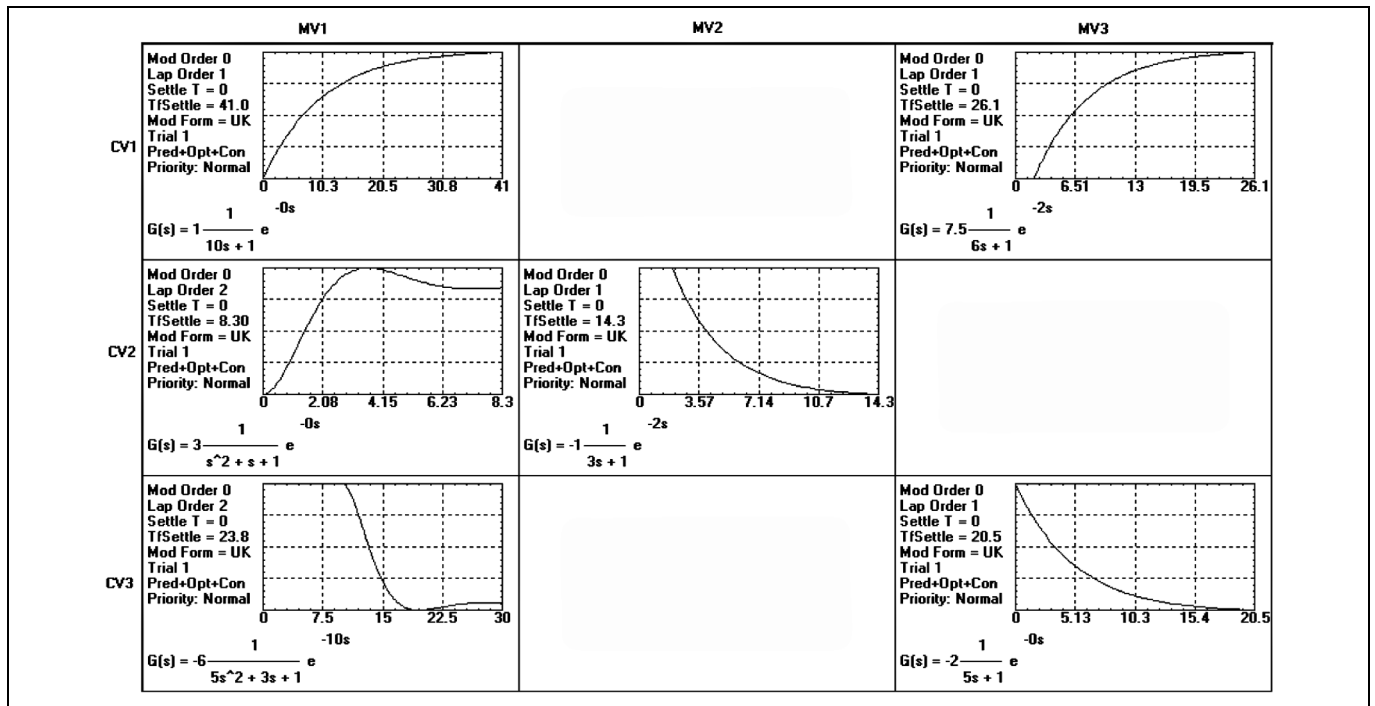


Рис. 1. Модельная матрица технологического процесса

Решение задачи УУ проиллюстрировано на рис. 2.

В задачах УУ наиболее распространенный вид целевой функции J — квадратичный функционал

$$J = \int_0^{\infty} [(x(t) - r(t))^T R (x(t) - r(t)) + \lambda^2 u^T(t) Q u(t)] dt,$$

где $r(t)$ — задающий сигнал, R и Q — диагональные матрицы с весовыми коэффициентами. Первое слагаемое под интегралом «штрафует» целевую функцию при отклонении от задающего сигнала. Второе слагаемое не позволяет совершать большие шаги по управляющим переменным.

В случае, если целевая функция задана в виде квадратичного функционала, а прогнозирующая модель — линейная, задача поиска оптимального управления сводится к задаче квадратичного программирования с линейными ограничениями.

Для расчета области робастности представим задачу УУ в дискретном виде (в таком виде она решается и в СУУТП):

$$x[k+1] = Ax[k] + Bu[k], \quad x[0] = x_0,$$

$$J[k] = \sum_{i=1}^p w_i (x[k+i|k] - r[k+i|k])^2 + \sum_{i=1}^c r_i \Delta u[k+i-1|k]^2 \rightarrow \min_{u[k|k], \dots, u[k+p-1|k]},$$

$$u_{\min} \leq u[k+i-1|k] \leq u_{\max}, \quad i = 1, \dots, c,$$

$$-\Delta u_{\max} \leq \Delta u[k+i-1|k] \leq \Delta u_{\max}, \quad i = 1, \dots, c,$$

$$x_{\min} \leq x[k+i|k] \leq x_{\max}, \quad i = 1, \dots, p.$$

Здесь c и p — соответственно горизонты управления и прогнозирования, выраженные в числе шагов по времени; обозначение $x[i|j]$ читается как «значение x в момент времени i , определенное в момент времени j ».

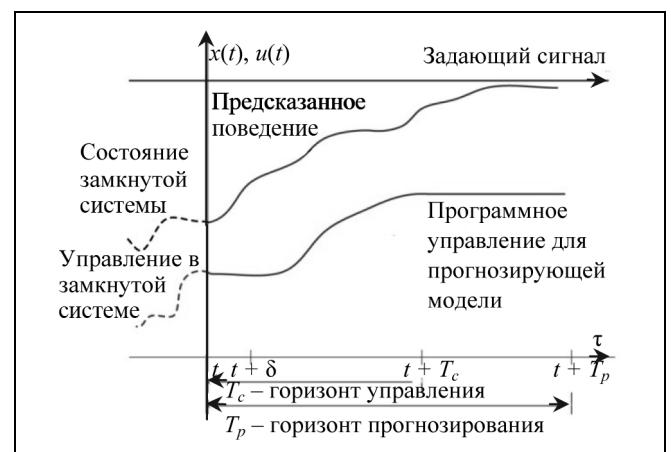


Рис. 2. Решение задачи усовершенствованного управления на горизонтах управления и прогнозирования

При дискретной постановке задачи УУ на каждом временном такте k с учетом модельной матрицы ТП оценивается вектор состояния $x[k]$ на заданном горизонте прогнозирования. Путем решения задачи линейно-квадратичного программирования находится оптимальный вектор управления $u[k]$ на заданном горизонте управления, доставляющий минимум функционалу $J[k]$ и удовлетворяющий всем требуемым ограничениям. Далее найденное оптимальное управление реализуется на одном временном такте, и задача поиска решения повторяется.

2. КРИТЕРИЙ ПРИМЕНИМОСТИ УПРАВЛЕНИЯ

Для УУ пока не существует методов, позволяющих аналитически оценить область робастной устойчивости по коэффициентам прогнозирующей модели. В литературе, однако, представлены многочисленные рекомендации, как путем модификации имеющегося неустойчивого контроллера получить устойчивый [7, 8]. В настоящей работе такой подход рассматриваться не будет, поскольку цель исследования заключается именно в оценке робастности УУ при рассогласовании параметров модели и ТП.

Перед тем, как рассчитывать область робастности УУ, необходимо ввести критерий применимости, позволяющий судить о правильности работы алгоритма УУ. Рассмотрим одномерный объект управления, динамические характеристики которого — коэффициенты линейной передаточной функции со временем запаздывания (K , T , τ). Под ошибкой управления далее понимается разность $x(t) - r(t)$.

Будем считать, что критерий применимости выполняется, если при смещении задания контро-

лируемой переменной с нулевого значения на величину D :

- решение задачи УУ асимптотически устойчиво и стремится к D ;
- не позднее времени $10T$ ошибка управления всегда не превышает $0,05D$ (пятипроцентная сходимость);
- возможное перерегулирование не выходит за определенные рамки (пятнадцатипроцентная сужающаяся воронка на временной оси от 0 до $10T + \tau$) (рис. 3).

Область значений коэффициентов передаточной функции, внутри которой выполняется критерий применимости, будем называть областью робастности алгоритма УУ.

Пример управления, для которого выполняется критерий применимости, представлен на рис. 3. Жирной горизонтальной линией обозначена уставка (D), затухающей кривой — динамика параметра ТП, наклонная прямая и штриховые линии обозначают допустимые границы изменения параметра ТП, t^* — время попадания значений параметра ТП в пятипроцентную «трубку».

Проверим, насколько сильно можно ошибиться в коэффициентах передаточной функции прогнозирующей модели без ущерба для стабильной работы алгоритма УУ. Для этого проведем симуляцию процесса УУ. В качестве одномерного объекта управления примем апериодическое звено первого порядка с добавлением времени чистого запаздывания. Коэффициенты передаточной функции, вообще говоря, могут быть произвольными. Добавление времени чистого запаздывания вносит нелинейность в процесс, в связи с чем построенная область робастности будет зависеть от соотношения T/τ . Приведем пример симуляции алгоритма УУ, при котором для коэффициентов передаточной функции объекта выполняется соотношение $T/\tau = 1$:

$$F(s) = \frac{1}{10s + 1} e^{-10s}.$$

В качестве передаточной функции прогнозирующей модели СУУТП выступит функция

$$\hat{F}(s) = \frac{K'}{T's + 1} e^{-\tau's}.$$

Интервал дискретизации алгоритма УУ зададим равным 1 мин. Для целевой функции выберем выражение

$$J = \min_{u[k|k], \dots, u[k+p-1|k]} \sum_{i=1}^p (x[k+i|k] - r[k+i|k])^2 + \sum_{i=1}^c \Delta u[k+i-1|k]^2.$$

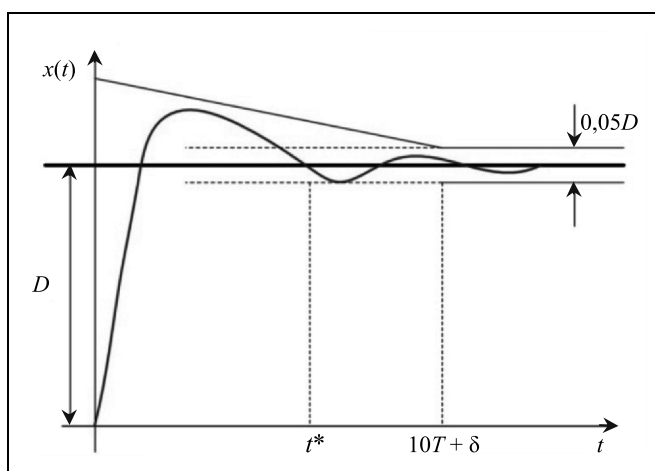


Рис. 3. Управление технологическим процессом, для которого выполняется критерий применимости

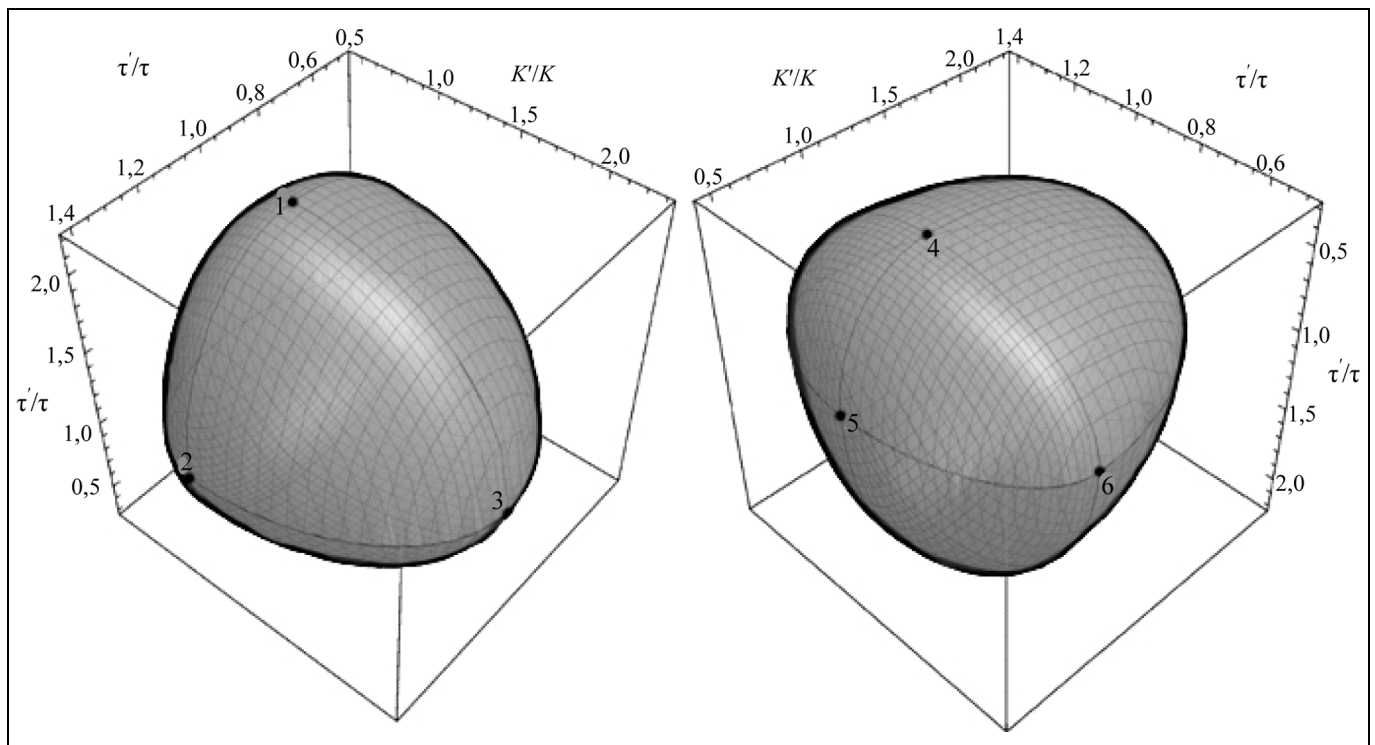


Рис. 4. Область робастности алгоритма усовершенствование управления

Для проведения расчетов была написана программа, имитирующая процесс УУ с учетом всех вышеперечисленных условий. Для идентификации области робастности УУ в программе задавались коэффициенты прогнозирующей модели K' , T' , τ' и наблюдался результат управления. Путем автоматического перебора подобрано 2000 значений, находящихся на границе области робастности УУ, а также проведена аппроксимация полученной зависимости. В результате расчетов получена область робастности УУ в трехмерном пространстве с осями $\frac{K'}{K}$, $\frac{T'}{T}$, $\frac{\tau'}{\tau}$, изображения которой приведены на рис. 4 (расчет проведен в среде Wolfram Mathematical). Цифрами 1—6 отмечены граничные точки, координаты которых приведены в таблице.

По совокупности всех тестов получены интервалы для коэффициентов передаточных функций прогнозирующей модели и объекта, внутри которых выполняется критерий применимости: $0,55 < K'/K < 2,3$; $0,3 < T'/T < 2,2$; $0,5 < \tau'/\tau < 1,41$.

Каждое из перечисленных условий справедливо, только если значения остальных параметров полагаются точными.

Область робастности алгоритма УУ (см. рис. 4) заметно несимметрична по отклонению параметра модели от точного значения. Рассмотрим поведе-

ние УУ на границах построенной области робастности:

- уменьшение коэффициента усиления K в прогнозирующей модели ведет к дестабилизации контура управления, при этом увеличение коэффициента усиления ведет только к увеличению времени регулирования, однако не ведет к дестабилизации контура;
- уменьшение времени релаксации T в прогнозирующей модели ведет к дестабилизации контура управления, при этом увеличение времени релаксации в пределах истинного значения приводит к увеличению времени регулирования, однако не ведет к дестабилизации контура;
- уменьшение или увеличение коэффициента чистого запаздывания τ ведет к дестабилизации контура управления.

Координаты граничных точек области робастности алгоритма УУ

№	K	T	τ
1	1	22	10
2	1	10	14,1
3	2,3	10	10
4	1	3	10
5	0,55	10	10
6	1	10	5

Важно, что для каждого коэффициента существует «безопасное» направление, в котором возможная ошибка приводит к меньшим последствиям для контура управления. Как правило, результатом идентификации модели объекта являются доверительные интервалы для коэффициентов передаточной функции, внутри которых находятся точные значения. Исходя из полученной области робастности, при идентификации прогнозирующей модели для СУУТП рекомендуется (в рамках доверительного интервала) при выборе:

- коэффициента усиления стремиться его максимизировать;
- времени релаксации стремиться это время увеличить;
- времени запаздывания стремиться его уменьшить.

3. ГРАНИЦЫ АКТУАЛЬНОСТИ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как отмечалось, область робастности построена при условии выполнения равенства $T/\tau = 1$. Промышленные объекты, как правило, проектируются таким образом, чтобы соотношение T/τ было не меньше 1, т. е. $T > \tau$. Это подтверждается соответствующим опытом внедрения СУУТП на различных производствах.

Численная проверка показывает, что при стремлении соотношения T/τ к бесконечности область незначительно расширяется и при $\tau = 0$ получается двумерная область, изображенная на рис. 5.

По мере уменьшения T/τ область робастности сужается и в пределе вырождается в точку: $K'/K = 1$, $T'/T = 1$, $\tau'/\tau = 1$.

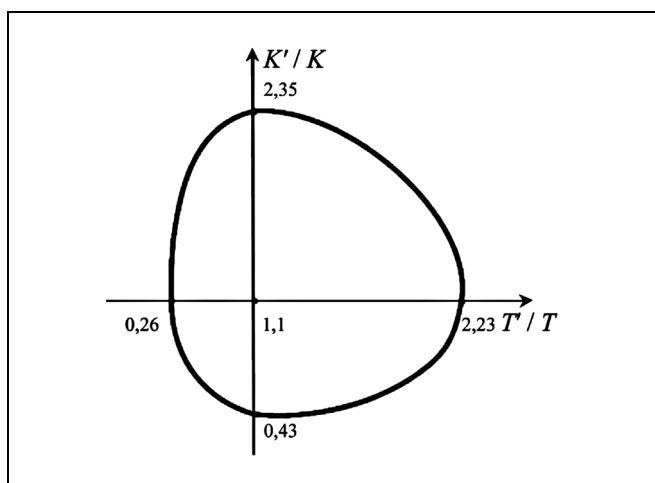


Рис. 5. Двумерная область робастности алгоритма усовершенствованного управления ($\tau = 0$)

Полученные результаты актуальны только для объектов с линейными характеристиками, не обладающими неминимально-фазовыми характеристиками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С 1990-х гг. усовершенствование управления стабильно занимает важную нишу в промышленной автоматизации. Его алгоритмы основаны на применении прогнозирующей модели для предсказания поведения технологического процесса в будущем. Для построения прогнозирующей модели разработчик системы усовершенствования управления технологического процесса выполняет статистический анализ его данных, полученных во время пошагового тестирования. Рассогласование между параметрами прогнозирующей модели и параметрами технологического процесса, как правило, увеличивается со временем. Показано, что алгоритмы усовершенствования управления робастны по отношению к коэффициентам прогнозирующей модели, что позволяет адекватно управлять технологическим процессом даже при заметном рассогласовании. На основе построенной области робастности даны рекомендации по идентификации коэффициентов передаточных функций. Интересным развитием данной темы может стать обобщение полученных выводов на многомерные объекты с неминимально-фазовыми характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Логунов П.Л., Шаманин М.В., Кнеллер Д.В. и др. Усовершенствованное управление ТП: от контура регулирования до общезаводской оптимизации // Автоматизация в промышленности. — 2015. — № 4. — С. 3—10. [Logunov, P.L., Shamanin, M.V., Kneller, D.V., et al. Usovershenstvovannoe upravlenie TP: ot kontura regulirovaniya do obshchezavodskoi optimizatsii // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. — 2015. — No. 4. — S. 3—10. (In Russian)]
2. Файрузов Д.Х., Бельков Ю.Н., Кнеллер Д.В., Торгашов А.Ю. Система усовершенствованного управления установкой первичной переработки нефти: создание, внедрение, сопровождение // Автоматизация в промышленности. — 2013. — № 8. — С. 3—14. [Fairuzov, D.Kh., Bel'kov, Yu.N., Kneller, D.V., Torgashov, A.Yu. Sistema usovershenstvovannogo upravleniya ustanovkoi pervichnoi pererabotki nefiti: sozdanie, vnedrenie, soprovozhdenie // Avtomatizatsiya v promyshlennosti. — 2013. — No. 8. — S. 3—14. (In Russian)]
3. Tatjevsky, P. Advanced Control of Industrial Processes: Structures and Algorithms. — London: Springer, 2010. — 332 p.
4. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. APC — усовершенствованное управление технологическими процессами // Датчики и системы. — 2005. — № 10. — С. 56—62. [Dozortsev, V.M., Kneller, D.V. APC — usovershenstvovannoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami // Datchiki i sistemy. — 2005. — No. 10. — S. 56—62. (In Russian)]

5. Zhe Wu, Junfeng Zhang, Zhihao Zhang and etc. — Economic model predictive control of stochastic nonlinear systems. — American Institute of Chemical Engineers AIChE J. — 2018. — No. 64. — P. 3312–3322.
6. Shuyou Yu, Ting Qu, Rolf Findeisen, Hong Chen. Model predictive control for uncertain nonlinear systems subject to chance constraints. — 2016 IEEE 55th Conference Decision and Control (CDC). — P. 2751–2756.
7. Kothare, M.V., Balakrishnan, V., Morari, M. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. — Automatica. — 1996. — No. 32 (10). — P. 1361–1379.
8. Morari, M., Zafriou, E. Robust Process Control. — Englewood Hills, N.J.: Prentice Hall, 1989. — 488 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Н.Н. Бахтадзе.

Поступила в редакцию 21.05.2019, после доработки 03.07.2019.

Принята к публикации 08.07.2019.

Черешко Алексей Анатольевич —

✉ Alexey.Chereshko@Honeywell.com,

Шундерюк Михаил Мирославович — канд. физ.-мат. наук,

АО «Хоневелл», г. Москва, Россия.

APPLICABILITY LIMITS OF MODEL-BASED PREDICTIVE CONTROL ALGORITHMS UNDER UNCERTAIN CONTROL OBJECT DYNAMICS

A.A. Chereshko[#], M.M. Shunderyuk

Honeywell Inc., Moscow, Russia

[#]✉ Alexey.Chereshko@Honeywell.com

Abstract. It is noted that advanced process control (APC) comprises a wide variety of mathematical methods and software algorithmic tools, application of which allows to increase the production profitability through more effective compensation of external impact on the process, automatic selection and maintenance of an optimal mode. It is also noted that model predictive control (MPC) of the multi-loop objects has been the mainstream of APC over the past 30 years. The robustness is examined of MPC algorithms with regard to model accuracy. The term «robustness» is understood as the ability of attaining the control aim under conditions of uncertainty. Control applicability criterion is formulated allowing to conclude about the correctness of the control algorithm. The model in the study is specified in a form of a transfer function of a linear object with time delay. Boundary conditions are determined for transfer function parameters, the violation of which leads to the control object destabilization or to the sluggish control. The results are given of the numerical calculation of 3D-domains of the model parameters, within which the control applicability criterion is met. The validity range of the results obtained is given.

Keywords: advanced process control (APC), model predictive control (MPC), robustness of advanced control algorithm, predictive model, transfer function of linear object, stability of control object, control applicability criterion, domain of robustness.



Новые издания ИПУ РАН

Кульба В.В., Сиротюк В.О. Формализованная методология повышения эффективности и качества патентных информационных фондов и опыт ее использования при формировании и развитии евразийского патентно-информационного пространства. — М.: ИПУ РАН, 2019. — 236 с. — ISBN 978-5-91450-238-3.

Сомов С.К. Сохранность информации в распределенных системах обработки данных. — М.: ИПУ РАН. — 2019. — 254 с. — ISBN 978-5-91450-235-2.

Лазарев А.А. Теория расписаний. Методы и алгоритмы. — М.: ИПУ РАН, 2019. — 408 с. — ISBN 978-5-91450-236-6.

Проблемы управления безопасностью сложных систем: материалы XXVII Междунар. конф., 18 дек. 2019 г., Москва / под общ. ред. А.О. Калашникова, В.В. Кульбы. — М.: ИПУ РАН. — 2019. — 459 с. — ISBN 978-5-91450-241-3.