УДК 662.642:621.926.7

ДВА ПОДХОДА К ПРИБЛИЖЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Л.М. Яковис

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

E-mail: leonid@yakovis.com

Ключевые слова: непрерывный технологический процесс, двухуровневое управление, APC, типовой регулятор, оптимизация.

Аннотация: Работа посвящена сравнительному анализу двух направлений в решении задач динамической оптимизации непрерывных технологических процессов: новой идеологии «усовершенствованного управления процессами» («Advanced process control», или коротко APC) и идеологии традиционного двухуровневого управления с применением типовых регуляторов. Для сравнения двух названных подходов был выбран инерционный объект с запаздыванием – модель, удовлетворительно описывающая поведение многих процессов непрерывной технологии. В качестве цели управления рассматривалась максимизация среднего уровня выходной переменной в системе, функционирующей в условиях случайных возмущений.

1. Введение

Стремительный прогресс в области управляющей вычислительной техники, и в частности, снятие многих ограничений по памяти и быстродействию микропроцессоров и регулирующих микроконтроллеров, позволяет существенно усложнить алгоритмы управления технологическими процессами (ТП). Указанные тенденции привели к распространению идеологии «усовершенствованного управления процессами» («Advanced process control», или коротко APC) [1]. Центральная идея этого подхода - управление на базе прогнозирующих моделей управляемого объекта (или MPC: Model Predictive Control), то есть построение математического представления управляемого процесса и встраивание этой модели в контур управления в режиме реального времени [2]. Практические разработки систем класса APC осуществляются, главным образом, на крупных объектах нефтепереработки и энергетики [3]. В близкой перспективе можно ожидать продвижения APC в менее «денежные» отрасли производств непрерывного типа.

Вместе с тем, на практике широко используется традиционная идеология двухуровневого управления с применением типовых регуляторов. Идея данного подхода заключается в построении иерархической структуры, где верхний уровень предназначен для формирования рационального с технико-экономических позиций режима функционирования ТП, а нижний уровень нацелен на стабилизацию ТП в окрестности «спущенного» с верхнего уровня задания [4, 5].

Отмечаемые сторонниками концепции APC преимущества заключаются в универсальности данного подхода, который «не боится» нелинейных многосвязных динамических объектов, запаздывания в каналах управления, ограничений на управляющие и выходные переменные, стохастического характера неконтролируемых возмущений. Получаемые в рамках APC алгоритмы способны, по их мнению, обеспечить за счет повышения качества управления существенно больший экономический эффект от автоматизации, чем традиционные методы. Этот тезис, однако, не столь очевиден, поскольку, как будет показано, при рациональном применении традиционный «двухуровневый» подход во многих случаях способен справиться со всеми перечисленными осложнениями, требуя для своей реализации существенно меньших затрат.

2. Сравнение двух подходов к оптимизации управляемых ТП

2.1. Задача оптимизации управляемых непрерывных ТП

Для широкого класса непрерывных ТП разнообразные проблемы динамической оптимизации могут быть формализованы в виде задачи минимизации математического ожидания средних потерь на длительном интервале функционирования

(1) $$\lim_{T\to\infty} M\left\{\frac{1}{T}\int_0^T \varphi(\boldsymbol{y}(t),\boldsymbol{u}(t))dt\right\}\longrightarrow \min.$$

Модель технологического процесса обычно задается зависимостью вектора выходных переменных $\boldsymbol{y}(t)$ от значений векторов управляющих воздействий $\boldsymbol{u}(\tau)$, искажаемой неконтролируемыми случайными возмущениями $\boldsymbol{n}(t)$

(2) $$\boldsymbol{y}(t)=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(\tau),\tau\in(-\infty,t))+\boldsymbol{n}(t).$$

При наличии характерных для ТП перекрестных связей, сложной динамики, содержащей наряду с инерционными звеньями элементы различного по каналам управления чистого запаздывания, и вероятностных ограничений на управляющие и выходные переменные $P\{\boldsymbol{u}(t)\in \boldsymbol{G_u}\}\ge 1-\varepsilon_u$ и $P\{\boldsymbol{y}(t)\in \boldsymbol{G_y}\}\ge 1-\varepsilon_y$ задача нахождения оптимального управления (1), (2) сложна для точного решения даже в простых вариантах. В этих условиях могут применяться разного рода эвристические подходы к приближенному решению, два из которых рассматриваются в данной работе.

2.2. Идеология APC

По сути, идеология APC опирается на схему так называемого разомкнуто-замкнутого управления, предложенную в конце семидесятых годов советским ученым И.И. Перельманом [6]. Она заключается в том, что на каждом шаге управления с использованием в регуляторе внутренней обратной связи, включающей имитационную модель объекта, производятся выделение, а затем перспективный прогноз случайных возмущений. Далее на основе такого прогноза путем «проигрывания» на имитационной модели управляемого процесса различных вариантов формируется многошаговая программа управления, оптимизирующая критерий (1) с учетом ограничений, после чего реализуется начальный шаг намеченной программы. Путем замены неизвестных значений возмущений спрогнозированными осуществляется переход от вероятностной задачи оптимизации к детерминированной. При этом должна быть определена программа $\boldsymbol{u}(\tau)$ для $\tau\in[t,T]$, минимизирующая целевую функцию

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T-t}\int_t^T \varphi(\boldsymbol{y}(\tau),\boldsymbol{u}(\tau))d\tau$$

при ограничениях

$$\boldsymbol{y}(\tau)=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(\theta),\theta\in(-\infty,\tau))+\hat{\boldsymbol{n}}(\tau|t),\ \boldsymbol{y}(\tau)\in\widetilde{\boldsymbol{G}}_y(\tau-t),\ \boldsymbol{u}(\tau)\in\boldsymbol{G}_u:\tau\in[t,T],$$

где $\hat{\boldsymbol{n}}(\tau|t)$ – прогноз возмущений по данным контроля, полученным к текущему моменту времени t, а область $\widetilde{\boldsymbol{G}}_y(\tau-t)$ получена определенным «сужением» области $\boldsymbol{G}_y$ с учетом неточности прогноза возмущений на время $(\tau-t)$.

2.3. Идеология двухуровневых систем

Допустим, для определенности, что целевая функция имеет аддитивный характер

$$\varphi(\boldsymbol{y},\boldsymbol{u})=\varphi_y(\boldsymbol{y})+\varphi_u(\boldsymbol{u}),$$

а вероятностные ограничения заданы в виде двухсторонних допусков

(3) $$P\{\boldsymbol{u}^{н}\le\boldsymbol{u}(t)\le\boldsymbol{u}^{в}\}\ge1-\varepsilon_u,\ P\{\boldsymbol{y}^{н}\le\boldsymbol{y}(t)\le\boldsymbol{y}^{в}\}\ge1-\varepsilon_y.$$

Если возмущения относительно малы (гипотеза слабовозмущенной системы), то можно вначале ими пренебречь и рассмотреть невозмущенную задачу статической оптимизации

(4) $$\min_{\bar{\boldsymbol{u}}}\left\{\bar{J}=\varphi_y(\bar{\boldsymbol{y}})+\varphi_u(\bar{\boldsymbol{u}})\ \middle|\ \bar{\boldsymbol{y}}=\bar{\boldsymbol{f}}(\bar{\boldsymbol{u}}),\ \boldsymbol{u}^{н}\le\bar{\boldsymbol{u}}\le\boldsymbol{u}^{в},\quad \boldsymbol{y}^{н}\le\bar{\boldsymbol{y}}\le\boldsymbol{y}^{в}\right\},$$

где статическая модель ТП $\bar{\boldsymbol{y}}=\bar{\boldsymbol{f}}(\bar{\boldsymbol{u}})$ соответствует установившейся реакции объекта (2) при нулевых возмущениях $\boldsymbol{n}(t)$ и постоянном управляющем воздействии $\bar{\boldsymbol{u}}$.

Далее, «вспоминая» о возмущениях и раскладывая подынтегральную функцию в (1) в ряд Тейлора в окрестности режима с точностью до малых второго порядка, а также линеаризуя в той же окрестности динамическую модель процесса (2) (гипотеза слабонелинейной системы), приходим к дополнительной задаче минимизации среднеквадратических отклонений от решения задачи (4)

(5) $$\Delta J_1=\lim_{T\to\infty}M\left\{\frac{1}{T}\int_0^T\left[\Delta\boldsymbol{y}^T(t)\boldsymbol{Q}\Delta\boldsymbol{y}(t)+\Delta\boldsymbol{u}^T(t)\boldsymbol{R}\Delta\boldsymbol{u}(t)\right]dt\right\}\longrightarrow\min,$$

где $2\boldsymbol{Q}$ и $2\boldsymbol{R}$ – матрицы вторых производных функций φ_y и φ_u, положительно определенные при условии выпуклости этих функций.

Рассмотренная декомпозиционная процедура позволяет получить приближенное решение достаточно сложной исходной задачи (1) в рамках двухуровневой системы управления, где верхний «медленный» уровень определяет оптимальные режимные параметры ТП $\bar{\boldsymbol{u}}$ и $\bar{\boldsymbol{y}}$, а нижний «быстрый» уровень оптимальным образом стабилизирует ТП в окрестности «спущенного сверху» режима. Задача верхнего уровня (4) решается одним из методов математического программирования. Что касается задачи нижнего уровня, то для линеаризованной в форме системы линейных дифференциальных уравнений динамической модели (2) ее можно решить известными методами среднеквадратической оптимизации, получив при этом линейные законы управления с обратной связью по отклонению выходных переменных от режимных значений.

Поскольку в задачах оптимизации ТП по технико-экономическим показателям целевая функция и статическая модель процесса обычно близки к линейным зависимостям, то решение задачи (4) может лежать на границах допусков (3). В этом случае сформированное рассмотренным образом приближенное решение исходной задачи (1) $\bar{\boldsymbol{u}}+\Delta\boldsymbol{u}(t),\ \bar{\boldsymbol{y}}+\Delta\boldsymbol{y}(t)$ не удовлетворяет системе неравенств (3), и чтобы устранить этот недостаток, следует заменить задачу (4) по необходимости более сложной задачей

$$\min_{\boldsymbol{u}} \left\{ \bar{J}(\bar{\boldsymbol{y}},\bar{\boldsymbol{u}}) \;\middle|\; \begin{array}{l} \bar{\boldsymbol{y}} = \bar{\boldsymbol{f}}(\bar{\boldsymbol{u}}),\;\; \boldsymbol{u}^{н} + \boldsymbol{\rho}_u \boldsymbol{\sigma}_u \le \bar{\boldsymbol{u}} \le \boldsymbol{u}^{в} - \boldsymbol{\rho}_u \boldsymbol{\sigma}_u, \\ \boldsymbol{y}^{н} + \boldsymbol{\rho}_y \boldsymbol{\sigma}_y \le \bar{\boldsymbol{y}} \le \boldsymbol{y}^{в} - \boldsymbol{\rho}_y \boldsymbol{\sigma}_y, \end{array} \right\}, \tag{6}$$

где $\boldsymbol{\sigma}_u$ и $\boldsymbol{\sigma}_y$ – векторы среднеквадратических отклонений (СКО) переменных $\boldsymbol{u}(t)$ и $\boldsymbol{y}(t)$ от своих средних режимных значений $\bar{\boldsymbol{u}}$ и $\bar{\boldsymbol{y}}$, а диагональные матрицы весовых коэффициентов $\boldsymbol{\rho}_u$ и $\boldsymbol{\rho}_y$ задают допустимые риски нарушения ограничений (3).

Модифицированная задача (6) отличается от ранее сформулированной задачи (4) лишь более жесткими ограничениями, которые с заданной степенью риска гарантируют соблюдение допусков (3) в условиях случайных возмущений. При этом, однако, следует модифицировать критерий задачи стабилизации – в [7] показано, что задача нижнего уровня управления может быть приближенно сведена к стандартной задаче типа (5) со специальным образом преобразованными матрицами $\boldsymbol{Q}$ и $\boldsymbol{R}$. Таким образом, и при наличии ограничений на управляющие и выходные переменные задача оптимизации ТП может быть приближенно решена в рамках двухуровневой структуры системы управления.

Здесь, однако, могут возникнуть серьезные трудности при попытке применить стандартные методы пространства состояния для решения задачи стабилизации режима на нижнем уровне управления [5]. Сложности обусловлены характерными для объектов непрерывной технологии запаздыванием в каналах управления и измерительными шумами. В этих условиях более удобными нередко оказываются типовые ПИ- и ПИД-регуляторы – для их реализации нет необходимости вычисления производных высокого порядка от неточно контролируемых переменных. Линеаризованные модели достаточно общего вида, пригодные для описания широкого круга ТП, могут быть записаны в виде передаточной матрицы $\mathbf{H}(p) = [h_{ij}(p)e^{-p\tau_{ij}}]$ [8]. Задача настройки многомерного ПИД-регулятора $\mathbf{W}(p) = \mathbf{A} + \mathbf{B}/p + \mathbf{C}p$ заключается в определении матричных коэффициентов $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ и $\boldsymbol{C}$ (для ПИ-регулятора $\mathbf{C} = \mathbf{0}$) из условия минимума показателя качества управления (5). В [9, 10] разработаны метод и пакет программ для приближенного численно-аналитического решения этой задачи.

2.4. Сравнительный анализ

Для сравнения двух названных подходов был выбран инерционный объект с запаздыванием

$$y(t) = x(t) + n(t), \quad x(t) = \frac{K}{TD+1}u(t-\tau),$$

где D – оператор дифференцирования, u и n – управляющие воздействия и неконтролируемые возмущения, K – коэффициент усиления, T и τ – постоянная времени и запаздывание.

В качестве цели управления рассматривалась максимизация среднего уровня выходной переменной в системе, функционирующей в условиях случайных возмущений. Задача осложняется необходимостью учета вероятностных ограничений на диапазон управляющих воздействий и на максимальный уровень выходной переменной.

Задача оптимизации формулируется в виде

$$J = \max \lim_{T\to\infty} \mathrm{M}\left\{ \frac{1}{\mathrm{T}}\int_0^T y(t)dt \;\middle|\; P\{y(t) \le y^{\max}\} \ge 1-\varepsilon_y,\;\; P\{u^{\min} \le u(t) \le u^{\max}\} \ge 1-\varepsilon_u \right\},$$

где ε_y и ε_u – допустимые риски выхода за ограничения.

Сравнительный анализ двух схем управления был выполнен путем имитационного моделирования в среде Matlab-Simulink применительно к объекту типа (1) с параметрами $K = 2, T = 5, \tau = 3, y^{max} = 5, u^{min} = 1, u^{max} = 4$. Случайные возмущения моделировались путем пропускания белого шума $\xi(t)$ единичной интенсивности через инерционное звено первого порядка с постоянной времени, равной 30. Моделирование двухуровневой схемы управления, выполненное применительно к ПИ-регулятору, показало, что на нижнем уровне при субоптимальной настройке регулятора среднеквадратичное отклонение выходной переменной от задания верхнего уровня составляет $\sigma_y = 0.16$ при интенсивности управляющих воздействий $\sigma_u = 0.21$. Если считать, что отклонения y от среднего значения с высокой вероятностью не превышают «трех сигм», то исходя из требования соблюдения ограничения $y(t) \leq y^{max}$, максимальное допустимое среднее значение выходной переменной составляет $\bar{y} = 5 - 3 \times 0.16 = 4.52$. Моделирование системы «усовершенствованного управления» дает следующие результаты: $\sigma_y = 0.14$, $\sigma_u = 0.46$, $\bar{y} = 5 - 3 \times 0.14 = 4.58$. Таким образом, двухуровневое управление, уступает по критерию оптимизации $\bar{y}$ всего [(4.58 – 4.52)/4.58]$\times 100 = 1.3\%$, но требует вдвое меньшей амплитуды управляющих воздействий.

3. Заключение

По результатам сравнения может быть сделан предварительный вывод, что для линейных и слабо нелинейных объектов управления более простой в реализации и дешевый метод двухуровневого управления может успешно конкурировать с более сложным и дорогостоящим методом APC.

Список литературы

1. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. APC – усовершенствованное управление технологическими процессами // Датчики и системы. 2005. № 10. С. 56-62.
2. Kouvaritakis B., Cannon M. Model Predictive Control. Classical, Robust and Stochastic. Springer International Publishing, 2016, 384 p.
3. http://www.exeplant.ru/experience/stati-apc/metodologiya-apc
4. Яковис Л.М. От единого информационного пространства к единому пространству управления производством // Автоматизация в промышленности. 2013. № 1. С. 20-26.
5. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления / Учебное пособие. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2010, 624 с.
6. Перельман И.И. Динамическая оптимизация в АСУ ТП на базе алгоритмов условного прогнозирования // Автоматика и телемеханика. 1978. №9. С. 146-160.
7. Яковис Л.М. Как сблизить теорию и практику управления технологическими процессами // Сборник докладов 4-й Всероссийской конференции «Управление и информационные технологии». СПб, 2006. С. 22-28.
8. Рей У. Методы управления технологическими процессами. М.: Мир, 1983, 368 с.
9. Яковис Л.М., Спорягин К.В. Настройка типовых регуляторов для многосвязных объектов управления // Мехатроника. Автоматизация., Управление. 2009. № 6. С. 55-63.
10. Яковис Л.М., Спорягин К.В. Автоматизированный расчет типовых регуляторов для многосвязных объектов управления // Автоматизация в промышленности. 2018. № 4. С. 58-64.
11. Шаповаленко Н.А., Яковис Л.М. Сравнение двух методов решения задач оптимизации управляемых технологических процессов // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. 19-24 ноября 2018 г., Институт прикладной математики и механики. СПб.: ПОЛИТЕХ-пресс. С. 342-345.