

Математика может быть занимательной, математические фокусы – впечатляющими, отношения, в которые вступают между собой цифры, – причудливыми. Числа не управляют миром, но показывают, как управляется мир.

Иоганн Вольфганг Гёте

брок $S=0,2$ при условии, что $\Delta \widehat{E}_1 \leq 0,3$. При $\Delta \widehat{E}_2 \leq 0,1$ наблюдается увеличение S до 1. Это связано с тем, что в ДОВ попадают значения, которые не встречаются в реальных условиях. В сравнении с бутстреп анализом предложенный алгоритм позволяет повысить точность модели до 40% RMSE на проверочной выборке.

Список литературы

1. Дозорцев В.М., Ицкович Э.Л., Кнеллер Д.В. Усовершенствованное управление технологическими процессами (APC): 10 лет в России // Автоматизация в промышленности. 2013. № 1. С. 12-19.
2. Бахтадзе Н.Н. Виртуальные анализаторы (идентификационный подход) // Автоматика и телемеханика. 2004. № 11. С. 3-24.
3. Kadlec P., Gabrys B., Strandt S. Data-driven soft sensors in the process industry // Computers and Chemical Engineering. – 2009. V. 33. Is. 4. P. 795-814.
4. Andrijić Ž.U., Cvetnić M., Bolf N. Soft sensor models for a fractionation reformate plant using small and bootstrapped data sets // Brazilian journal of chemical engineering. – 2018. V. 35. No 2. P. 745-756.
5. Fortuna L., Graziani S., Xibilia M.G. Comparison of soft-sensor design methods for industrial plants using small data sets // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2009. V. 58. Is. 8. P. 2444-2451.
6. Napolia G., Xibilia M.G. Soft sensor design for a topping process in the case of small datasets // Computers and chemical engineering. – 2011. V. 35. P. 2447-2456.
7. Chen Z.-S., Zhu B., He Y.-L., Yu L.-A. A PSO based virtual sample generation method for small sample sets: Applications to regression datasets // Engineering applications of artificial intelligence. – 2017. V. 59. P. 236-243.
8. Shang C., Yang F., Huang D., Lyu W. Data-driven soft sensor development based on deep learning technique // Journal of Process Control. – 2014. No. 24. P. 223-233.
9. Abrams D.S., Prausnitz J.M. Statistical thermodynamics of liquid mixtures: a new expression for the excess Gibbs energy of partly or completely miscible systems // AIChE Journal. – 1975. V. 21. No 1. P. 116-128.
10. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: «Наука», 1974.

Самотылова Светлана Александровна – младший научный сотрудник, Торгашов Андрей Юрьевич – д-р техн. наук, зав. лабораторией систем управления технологическими процессами Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН.

Контактный телефон (4232) 31-02-02.

E-mail: torgashov@iacp.dvo.ru

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ НЕПРЕРЫВНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Л.М. Яковис (СПбПУ Петра Великого)

Работа посвящена анализу и сравнению двух направлений в решении задач динамической оптимизации непрерывных технологических процессов: новой идеологии «усовершенствованного управления процессами» и идеологии традиционного двухуровневого управления с применением типовых регуляторов. Для сравнения альтернативных подходов рассмотрен инерционный объект с запаздыванием – модель, удовлетворительно описывающая поведение многих процессов непрерывной технологии.

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

*Крошка сын к отцу пришел,
и спросила кроха:
— Что такое хорошо
и что такое плохо?
(В. Маяковский)*

Стремительный прогресс в области управляющей вычислительной техники и, в частности, снятие многих ограничений по памяти и быстрдействию 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 (Model Predictive Control: MPC), 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 АРС 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 АРС 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, в принципиальном плане требуя для своей реализации меньших затрат.

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:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} M \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \phi(y(t), u(t)) dt \right\} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Модель ТП обычно задается зависимостью вектора выходных переменных $y(t)$ от значений векторов управляющих воздействий $u(\tau)$, искажаемой неконтролируемыми случайными возмущениями $n(t)$:

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

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 $P\{u(t) \in G_u\} \geq 1 - \varepsilon_u$ и $P\{y(t) \in G_y\} \geq 1 - \varepsilon_y$, 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.

Идеология АРС

По сути, идеология АРС опирается на схему так называемого разомкнуто-замкнутого управления, предложенную в семидесятые годы советским ученым И. И. Перельманом [6] (рис. 1).

Она заключается в том, что на каждом шаге управления с использованием в регуляторе внутренней об-

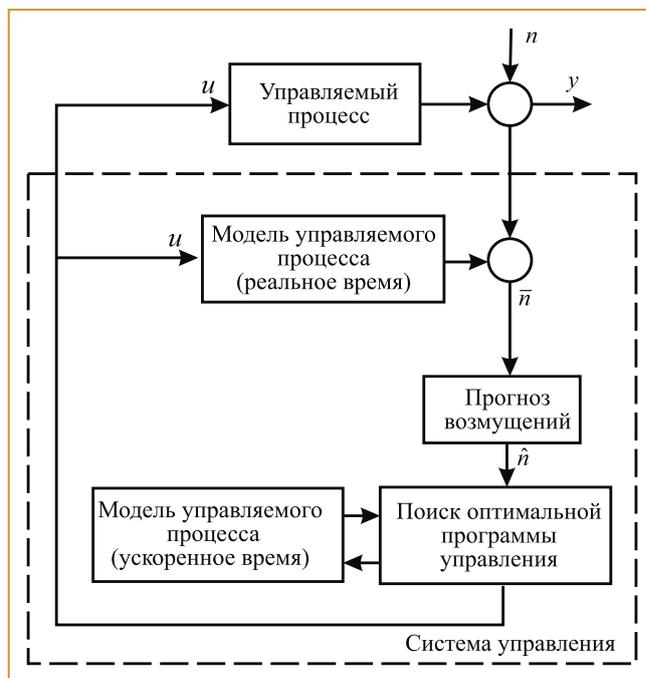


Рис. 1. Блок-схема системы разомкнуто-замкнутого управления

ратной связи, включающей имитационную модель объекта (модель работает в реальном времени), производятся выделение, а затем перспективный прогноз случайных возмущений. Далее на основе такого прогноза путем «проигрывания» на имитационной модели управляемого процесса (модель работает в ускоренном времени) 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 $u(\tau)$ для $\tau \in [t, T]$, минимизирующая целевую функцию

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

при ограничениях

$$y(\tau) = f(u(\theta), \theta \in (-\infty, \tau)) + \hat{n}(\tau|t),$$

$$y(\tau) \in \tilde{G}_y(\tau-t), u(\tau) \in G_u: \tau \in [t, T],$$

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

Идеология двухуровневых систем с типовыми регуляторами

Допустим, для определенности, что целевая функция имеет аддитивный характер

$$\phi(y, u) = \phi_y(y) + \phi_u(u),$$

а вероятностные ограничения заданы в виде двухсторонних допусков

$$P\{u'' \leq u(t) \leq u^e\} \geq 1 - \varepsilon_u, \quad P\{y'' \leq y(t) \leq y^e\} \geq 1 - \varepsilon_y. \quad (3)$$

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

$$\min_{\bar{u}} \left\{ \bar{J} = \phi_y(\bar{y}) + \phi_u(\bar{u}) \left| \begin{array}{l} \bar{y} = \bar{f}(\bar{u}), \\ u'' \leq \bar{u} \leq u^e, \quad y'' \leq \bar{y} \leq y^e \end{array} \right. \right\}, \quad (4)$$

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

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

где $2Q$ и $2R$ — 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{u} и \bar{y} , а нижний «быстрый» уровень оптимальным образом стабилизирует ТП в окрестности «спущенного сверху» режима (рис. 2).

Задача верхнего уровня (4) решается одним из методов математического программирования. Что касается задачи нижнего уровня, то для линеаризованной в виде системы линейных дифференциальных уравнений динамической модели (2) ее можно решить известными методами среднеквадратической опти-

мизации, 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) $u(t) = \bar{u} + \Delta u(t)$, $y(t) = \bar{y} + \Delta y(t)$ не удовлетворяет системе неравенств (3), и для устранения этого недостатка следует заменить задачу (4) по необходимости более сложной задачей

$$\min_{\bar{u}} \left\{ \bar{J}(\bar{y}, \bar{u}) \left| \begin{array}{l} \bar{y} = \bar{f}(\bar{u}), \quad u'' + \rho_u \sigma_u \leq \bar{u} \leq u^e - \rho_u \sigma_u, \\ y'' + \rho_y \sigma_y \leq \bar{y} \leq y^e - \rho_y \sigma_y, \end{array} \right. \right\} \quad (6)$$

где σ_u и σ_y — векторы среднеквадратических отклонений (СКО) переменных $u(t)$ и $y(t)$ от своих средних режимных значений \bar{u} и \bar{y} , а диагональные матрицы весовых коэффициентов ρ_u и ρ_y задают допустимые риски нарушения ограничений (3).

Модифицированная задача (6) отличается от ранее сформулированной задачи (4) лишь необходимостью создания так называемых страховых запасов, что сводится к определенному ужесточению исходных ограничений. Это делается для того, чтобы с заданной степенью риска гарантировать соблюдение допусков (3) в условиях случайных возмущений. Кроме того, следует модифицировать критерий задачи стабилизации. Как показано в [7], задача нижнего уровня управления может быть приближенно сведена к стандартной задаче типа (5) со специальным образом преобразованными матрицами Q и 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 состояний [5] для решения задачи стабилизации режима на нижнем уровне управления. 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 $H(p) = [h_{ij}(p)e^{-p\tau_{ij}}]$ [8]. Задача настройки многомерного ПИД-регулятора $W(p) = A + B/p + Cp$ заключается в определении матричных коэффициентов A , B и C (для ПИ-регулятора $C=0$) из условия

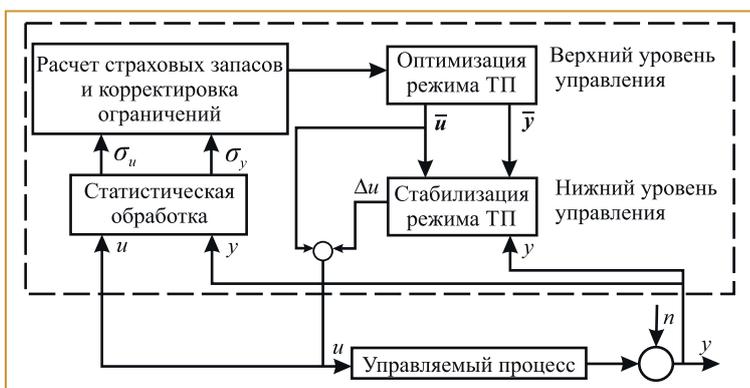


Рис. 2. Блок-схема двухуровневой системы управления

минимума показателя качества управления (5). В [9, 10] разработаны метод и пакет программ приближенного численно-аналитического решения этой задачи для систем произвольной размерности.

Сравнительный анализ двух схем управления [11]

Для сравнения двух названных подходов был выбран инерционный объект с запаздыванием

$$y(t) = x(t) + n(t), \quad x(t) = \frac{K}{TD+1}u(t - \tau), \quad (7)$$

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

$$J = \max \lim_{T \rightarrow \infty} M \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt \left| \begin{array}{l} P\{y(t) \leq y^{\max}\} \geq 1 - \varepsilon_y, \\ P\{u^{\min} \leq u(t) \leq u^{\max}\} \geq 1 - \varepsilon_u \end{array} \right. \right\},$$

где ε_y и ε_u — допустимые риски выхода за ограничения.

Аналитическое решение задач стохастической динамической оптимизации затруднительно, поэтому применим к решению два ранее упомянутых подхода. Начнем с более простого двухуровневого управления. Метод реализует идею частотной декомпозиции. Задача верхнего уровня состоит в оптимизации квазистатического режима, а нижний уровень призван стабилизировать ТП в окрестности оптимального режима. Сначала, пренебрегая случайными возмущениями $n(t)$, то есть полагая $n(t)=0$, находим оптимальный квазистатический режим. При этом решается задача

$$J = \max \left\{ y \mid y = Ku, \ y \leq y^{\max}, \ u^{\min} \leq u \leq u^{\max} \right\}.$$

Предположим, что, как это обычно и бывает, обеспечен определенный запас по управлению, то есть $Ku^{\max} > y^{\max}$. Тогда при $K > 0$ решение задачи очевидно — управление должно поддерживаться на постоянном уровне $\bar{u} = y^{\max} / K$.

Далее решается динамическая задача стабилизации оптимального режима в системе, показанной на рис. 3.

Передаточная функция регулятора $W(p)$ может формироваться разными способами. Наиболее распространены законы регулирования типа ПИ- и ПИД-регуляторов. Одним из наиболее популярных методов настройки их параметров является «метод внутренней модели» (Internal Model Controller: ИМС [12]).

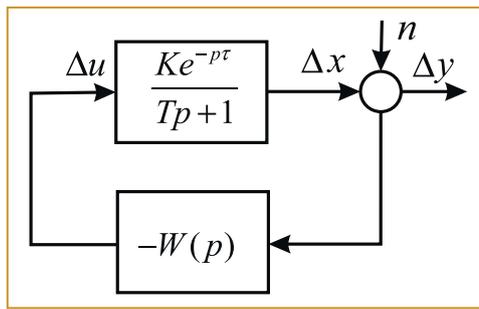


Рис. 3. Блок-схема системы стабилизации

Во-первых, он приводит к простым формулам для расчета параметров типовых регуляторов. Во-вторых, из вывода формул ИМС-метода становится ясно, что при правильной настройке типовые регуляторы приближаются по качеству управления к регулятору-предиктору, обеспечивающему минимальный уровень σ_y — СКО выходной переменной от заданного режимного значения.

Близок к ИМС-методу компенсационный метод настройки параметров типовых регуляторов [13], его преимущество заключается в возможности учета различных инженерных требований к переходным процессам в системе управления.

Пересчитанное с учетом некомпенсированной части возмущений управление верхнего уровня имеет вид, $\bar{u} = (y^{\max} - \omega_y \sigma_y) / K$, где ω_y — константа, зависящая от ε_y .

Теперь рассмотрим алгоритм разомкнуто-замкнутого управления. Идея метода состоит в выделении неконтролируемых возмущений $n(t)$ путем сравнения выхода объекта управления (ОУ) с выходом модели, работающей в реальном времени (рис. 1), предсказании их поведения $\hat{n}(t + \tau | t)$ в будущем, формировании программы управляющих воздействий, призванных скомпенсировать предсказанные возмущения, и реализации начального шага этой программы. В итоге реализуется так называемое разомкнуто-замкнутое управление, сочетающее программное управление с управлением с обратной связью по ошибке.

В соответствии с принципом максимума Понтрягина для скорейшего достижения требуемого значения выходной переменной необходимо использовать релейное управление, поддерживая управляющее воздействие на верхней или на нижней границе. Если же выходная переменная достигла требуемой величины, то в дальнейшем управление должно формироваться из условия, что выходная переменная следует заданной программе. С учетом запаздывания τ в каждый момент времени t заданная программа формируется на интервал времени $[t + \tau, t + \tau + \theta]$.

Для каждого $\theta > 0$ эта программа задает требуемое значение выходной переменной

$$\varphi(t, \theta) = y^{\max} - \omega_y \sigma_e(t + \tau | t) - \hat{n}(t + \tau + \theta | t), \quad (8)$$

исходя из стремления достичь максимального уровня y^{\max} с учетом прогноза возмущений $\hat{n}(t + \tau + \theta | t)$ и страхового запаса $\omega_y \sigma_e(t + \tau | t)$, связанного с ошибками этого прогноза $e(t) = \hat{n}(t | t - \tau) - n(t)$.

Управление $u(t)$, которое необходимо для удержания выходной переменной $y(t)$ на требуемой траектории (8), представляет собой сумму постоянного (при условии стационарности случайных возмущений) ре-

жимного значения $\bar{u} = \frac{y^{\max} - \omega_y \sigma_e(t + \tau | t)}{K}$ и корректи-

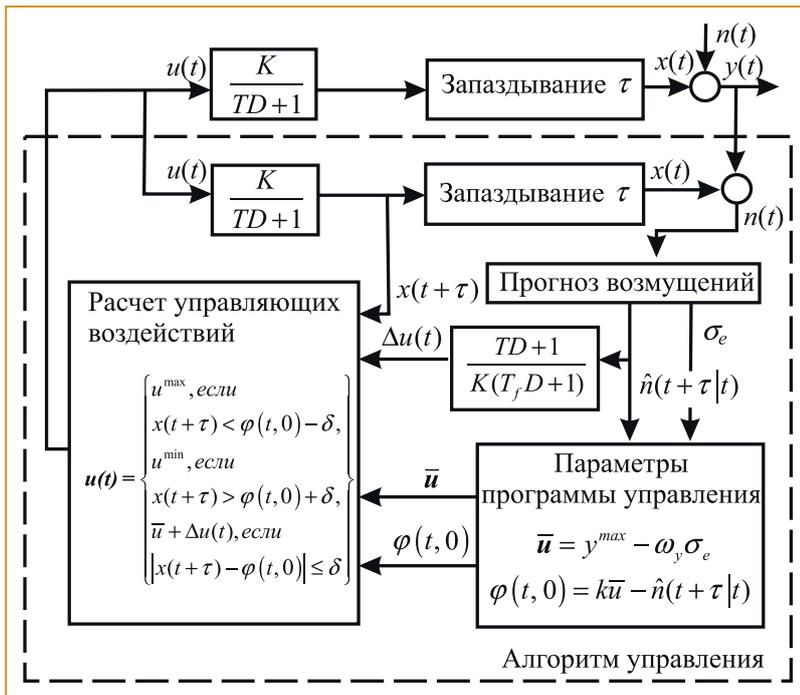


Рис. 4. Блок-схема алгоритма управления разомкнуто-замкнутого типа

рующей добавки $\Delta u(t) = -\frac{TD+1}{K} \hat{n}(t+\tau|t)$. Последнее

преобразование физически не реализуемо, так как старшая степень полинома в числителе выше, чем в знаменателе. В таких случаях, переходя к так называемому «реальному» дифференцированию, дополняют передаточную функцию последовательным инерционным звеном первого порядка с малой постоянной времени T_f .

Для исключения ведущих к износу исполнительных механизмов частых переключений управляющего воздействия с одного крайнего положения в другое и обратно в закон управления вводится зона нечувствительности δ так, чтобы релейное управление производилось лишь при достаточно серьезном отклонении выходной переменной от расчетной программы. Иными словами, релейное управление должно включаться лишь при нарушении условия $|x(t+\tau) - \varphi(t,0)| \leq \delta$.

В итоге приходим к алгоритму разомкнуто-замкнутого управления, блок-схема которого приведена на рис. 4.

Сравнительный анализ двух схем управления был выполнен на численном примере путем имитационного моделирования в среде Matlab-Simulink применительно к объекту типа (7) с параметрами

$$K = 2, T = 5, \tau = 3, y^{max} = 5, u^{min} = 1, u^{max} = 4.$$

Случайные возмущения моделировались путем пропуска белого шума $\xi(t)$ единичной интенсивности через инерционное звено первого порядка с постоянной времени, равной 30. Моделирование двухуровневой схемы управления, выполненное при-

менительно к ПИ-регулятору, показало, что на нижнем уровне при субоптимальной настройке регулятора, рассчитанной по компенсационному методу [13], среднеквадратическое 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» при $\delta = 0,1$ и $T_f = 0,05$ 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.

Заключение

Рассмотрены два достаточно универсальных подхода к приближенной оптимизации управления непрерывными ТП, которые характеризуются сложной многомерной и, вообще говоря, нелинейной динамикой, перекрестными связями между управляющими воздействиями и выходными переменными, случайными неконтролируемыми возмущениями, ограничениями на допустимую область изменения переменных. Первый подход, получивший название усовершенствованного управления ТП, базируется на идее разделения задачи управления на две относительно автономные части: выделение и статистический прогноз случайных возмущений и компенсация спрогнозированных возмущений методами детерминированной теории управления. Второй подход основывается на идее частотной декомпозиции, когда «медленный» верхний уровень системы рассчитывает оптимальные режимные параметры ТП и «спускает» их в качестве заданий на нижний «быстрый» уровень, который стабилизирует ТП с применением типовых регуляторов. Сложности с настройкой многочисленных параметров алгоритма управления можно преодолеть с использованием упоминаемого в статье пакета программ настройки многомерных типовых регуляторов для многосвязных ОУ произвольной размерности.

Оба рассмотренных подхода применены к одной и той же модельной задаче управления, где требуется поддерживать на максимально высоком уровне выход инерционного объекта с запаздыванием в условиях неконтролируемых случайных возмущений, соблюдая при этом ограничения на управляющее воздействие и выходную переменную. Смысл этого примера за-

ключается, разумеется, не в том, чтобы поставить точку в сложном вопросе сравнения двух альтернативных подходов в пользу одного из них. Каждый из методов имеет свои «про» и «контра». Цель — показать, что термин «усовершенствованное управление» носит, в известной мере, условный характер, и что в конкретных случаях как по качеству управления, так и тем более по комплексным экономическим параметрам тяготеющий к традиционной автоматике «двухуровневый подход» может успешно конкурировать с альтернативным инновационным подходом APC. Можно предположить, что это в большой мере относится к относительно слабо нелинейным и слабо возмущенным объектам управления. Важно отметить и то, что возможны комбинированные схемы управления, сочетающие оба рассмотренных подхода. Так, расчетные данные APC систем в качестве уставок обычно передаются типовым регуляторам. С другой стороны, в двухуровневых системах при значительном запаздывании в ОУ на нижнем уровне вместо типовых регуляторов могут использоваться алгоритмы управления с выделением и прогнозом неконтролируемых возмущений, что типично для APC.

Список литературы

1. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. APC – усовершенствованное управление технологическими процессами // Датчики и системы. 2005. № 10.
2. Kouvaritakis B., Cannon M. Model Predictive Control. Classical, Robust and Stochastic. Springer International Publishing, 2016.
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.
5. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2010.
6. Перельман И.И. Динамическая оптимизация в АСУ ТП на базе алгоритмов условного прогнозирования // Автоматика и телемеханика. 1978. №9.
7. Яковис Л.М. Как сблизить теорию и практику управления технологическими процессами // Сборник докладов 4-й Всероссийской конференции «Управление и информационные технологии». СПб, 2006.
8. Рей У. Методы управления технологическими процессами. М.: Мир, 1983.
9. Яковис Л.М., Спорягин К.В. Настройка типовых регуляторов для многосвязных объектов управления // Мехатроника, Автоматизация, Управление. 2009. №6.
10. Яковис Л.М., Спорягин К.В. Автоматизированный расчет типовых регуляторов для многосвязных объектов управления // Автоматизация в промышленности. 2018. №4.
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, Институт прикладной математики и механики, СПб.: ПОЛИТЕХ-пресс.
12. PID Control for Multivariable Processes // Qing-Guo Wang [et al.] Springer-Verlag. 2008.
13. Яковис Л.М. Простые способы расчета типовых регуляторов для сложных объектов промышленной автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2007. № 6.

Яковис Леонид Моисеевич – д-р техн. наук, ст. научный сотрудник, проф. каф. "Механика и процессы управления" Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого (Санкт-Петербурге). E-mail: leonid@yakovis.com

НОВЫЕ КНИГИ

Поляк Б. Т., Хлебников М. В., Рапопорт Л. Б. Математическая теория автоматического управления. М.: ЛЕНАНД. 2019. 504 с.

В учебном пособии излагаются основы теории управления в современной форме. Помимо традиционных разделов теории линейных систем в книгу включены вопросы управления в условиях неопределенности (робастность, внешние возмущения), управления нелинейными систе-

мами (абсолютная устойчивость, теоремы Ляпунова, хаос), техника линейных матричных неравенств. В приложениях содержится требуемый математический аппарат. Многочисленные примеры демонстрируют особенности применения теории.

Теория управления (дополнительные главы). Под ред. Д. А. Новикова. М.: ЛЕНАНД. 2019. 560 с.

Учебное пособие представляет собой «навигатор» по таким направлениям математической теории управления, как: неопределенность в системах управления (стохастические и адаптивные системы, идентификация, управление с итеративным обучением); оптимизация (в задачах большой размерности; распределенная, невыпуклая) и управление; системы с распределенными параметрами, многоагентные и сетевые системы управления; интеллектуальное управление (системы с переключениями, нечеткие систе-

мы, искусственные нейронные сети); стратегическое поведение в системах управления, описываемое аппаратом дифференциальных, кооперативных, иерархических или рефлексивных игр. Его целью является расширить кругозор студентам магистратуры и аспирантам математических и технических специальностей, уже освоившим теорию автоматического управления по классическим учебникам, т. е. дать им общее представление о многообразии задач и направлений современной теории управления.