

ОСОБЕННОСТИ ЗАДАЧ
РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ.
Часть 2. ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ
РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Введение

При создании высокоэффективных систем оптимального управления технологическими объектами на базе методов моделирования и оптимизации первым этапом синтеза является построение математической модели технологического объекта. Здесь возникает трудность выбора степени детализации последней, поскольку упрощение ведет к потере информации об объекте и, как следствие, к несоответствию синтезированного регулятора характеристикам объекта, а использование иерархических моделей с высокой степенью детализации приведет к громоздкой модели, сложным алгоритмам синтеза, сложной структуре регулятора и невозможности использования модели в реальном времени. Большинство технологических объектов управления нелинейны, однако в установившихся режимах их можно рассматривать как линейные с ошибкой по выходу меньше 20 %. Как показано в первой части статьи [1], именно для технологических объектов, из-за их особых свойств, целесообразно использовать синтез системы управления на линейной модели, при этом результирующая система обязательно должна иметь робастные свойства.

В настоящее время разработано достаточно методик расчета робастных регуляторов, в частности 2-Риккати подход, D-K-итерации, LMI-подход, Loop shaping и др. [2, 3], однако для технологических объектов ни один из них не нашел широкого применения. Основной проблемой для внедрения известных робастных алгоритмов для технологических объектов кроме сложности самих алгоритмов синтеза стало использование математических моделей в структуре микропроцессорной системы управления. Последнее обстоятельство пока недостаточно изучено и не нашло должной реализации, в отличие от таких алгоритмов, как нечеткие и нейросетевые регуляторы, алгоритмические блоки которых уже несколько десятилетий используются в библиотеках программируемых логических контроллеров известных фирм (Siemens, Schneider Electric и др.).

Цель исследования — рассмотреть существующие алгоритмы синтеза, разработать робастные регуляторы и сравнить результаты моделирования для технологических объектов, условия функционирования и неопределенности которых приведены в первой части статьи [1].

Структура моделированной системы управления с робастными регуляторами

В первую очередь из всего множества известных в литературе алгоритмов необходимо выделить алгоритмы, которые будем рассматривать. Кроме того, методы, основанные на минимизации H_∞ -нормы и использующие одинаковую структуру регулятора в теории, должны привести к одинаковой синтезируемой системе управления, однако на практике параметры регулятора могут отличаться вследствие числовой оптимизации субоптимальной задачи. Отбросив алгоритмы, использующие порядок регулятора выше порядка объекта, рассмотрим систему управления, представленную на рис. 1. Здесь $\mathbf{G}(\mathbf{q}, s)$ — матричная передаточная функция математической модели технологического объекта; \mathbf{q} — вектор пара-

метрических неопределенностей модели; s — комплексная переменная; $\mathbf{u}(t)$ — вектор управления, $\mathbf{w}(t)$ — вектор внешних возмущений; $\mathbf{r}(t)$ — вектор задающего сигнала; $\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \mathbf{r}(t) - \mathbf{y}(t)$ — вектор отклонений от заданного сигнала; $\mathbf{y}(t)$ — вектор измеряемых выходов; $\Delta(s)$ — матричная неопределенность; $\mathbf{W}(s)$ — матричная передаточная функция, ограничивающая частотный диапазон влияния $\Delta(s)$, а также задающая масштаб ее изменения; $\mathbf{K}(s)$ — матричная передаточная функция регулятора; $\mathbf{H}(s)$ — матричная передаточная функция системы управления от входа $[\mathbf{w}(t), \mathbf{r}(t)]^T$ к выводу $[\boldsymbol{\varepsilon}(t), \mathbf{u}(t)]^T$.

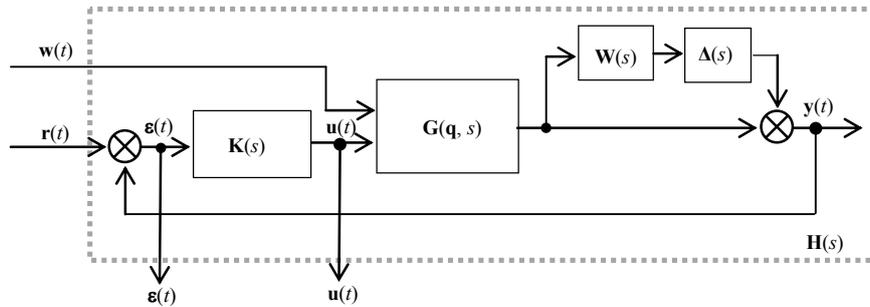


Рис. 1

Расчет параметров робастного регулятора

Для многокорпусной выпарной установки (МВУ), математическая модель которой с неопределенностями приведена в [1], рассмотрим несколько структур регулятора, представленных матричной передаточной функцией $\mathbf{K}(s)$:

две статические структуры:

$$\mathbf{K}_P(s) = \begin{bmatrix} k_{p1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{p2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{p3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{p4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{p5} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_{PK}(s) = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & k_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{33} & k_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{44} & k_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{55} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

и одну динамическую структуру:

$$\mathbf{K}_{2R,\mu}(s) \xrightarrow{s} \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c \mathbf{y}, \\ \mathbf{u} = \mathbf{C}_c \mathbf{x}_c, \end{cases} \quad (3)$$

где \mathbf{x}_c — вектор координат состояния регулятора.

Структура (1) в настоящее время самая распространенная в системе управления МВУ, реализуется как локальные П-регуляторы по каждому из контуров управления. С учетом влияния контуров управления на соседние контуры в системе с $\mathbf{K}_P(s)$ рассматривается структура (2), которая кроме П-регуляторов по основным каналам имеет компенсаторы для устранения влияния соседних контуров. Структура (3) в виде наблюдателя 10-го порядка имеет все преимущества динамического регулятора.

Параметры (1)–(3) определяются по критерию минимальной энергии выхода:

$$J = \min_{\mathbf{K}(s) \in \Omega} \|\mathbf{H}(s)\|_{\infty}^2, \quad (4)$$

при этом для структуры (3) рассчитываются параметры \mathbf{A}_c , \mathbf{B}_c и \mathbf{C}_c по двум алгоритмам: 2-Риккати подход для номинального объекта; D-K-итерации для объекта с неопределенностями [3], а для (1) и (2) структур применялся итерационный подход негладкого синтеза [4].

Используя указанные алгоритмы для МВУ, получаем следующие настройки робастных регуляторов:

• для $\mathbf{K}_P(s)$:

$$k_{p1} = -0,002; \quad k_{p2} = -0,005; \quad k_{p3} = -0,004; \quad k_{p4} = -0,014; \quad k_{p5} = -1,450;$$

• для $\mathbf{K}_{PK}(s)$:

$$k_{11} = -0,001; \quad k_{12} = 0,113; \quad k_{22} = -0,135; \quad k_{23} = 0,021; \quad k_{33} = -0,023;$$

$$k_{32} = 0,569; \quad k_{44} = -0,937; \quad k_{45} = 1,150; \quad k_{55} = -1,000;$$

• для $\mathbf{K}_{2R}(s)$:

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} -0,010 & 0,010 & 0 & 0 & 0 & -0,325 & -0,005 & 0 & 0 & 0 \\ 0,007 & -0,014 & 0,007 & 0 & 0 & -0,005 & -0,157 & -0,004 & 0 & 0 \\ 0,001 & 0,010 & -0,026 & 0,017 & 0 & 0 & -0,004 & -0,220 & -0,009 & 0 \\ -0,001 & -0,001 & 0,018 & -0,027 & 0,009 & 0 & 0 & -0,009 & -0,235 & -0,005 \\ -0,002 & -0,003 & -0,002 & 0,009 & -0,016 & 0 & 0 & 0 & -0,004 & -0,314 \\ 1,163 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,870 & -0,008 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,163 & 0 & 0 & 0 & -0,008 & -0,605 & -0,007 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,429 & 0 & 0 & 0 & -0,007 & -0,795 & -0,017 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,613 & 0 & 0 & 0 & -0,017 & -0,871 & -0,009 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,5 & 0 & 0 & 0 & -0,009 & -1,254 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} -0,886 & -0,012 & 0 & 0 & 0 \\ -0,015 & -0,427 & -0,012 & 0 & 0 \\ 0 & -0,010 & -0,601 & -0,026 & 0 \\ 0 & 0 & -0,025 & -0,641 & -0,015 \\ 0 & 0 & 0 & -0,012 & -0,857 \\ -2,239 & -0,021 & 0 & 0 & 0 \\ -0,021 & -1,516 & -0,020 & 0 & 0 \\ 0 & -0,020 & -2,033 & -0,046 & 0 \\ 0 & 0 & -0,046 & -2,242 & -0,025 \\ 0 & 0 & 0 & -0,025 & -3,286 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}_c = \begin{bmatrix} 0,009 & 0,005 & 0,001 & 0 & 0 & 0,001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,016 & 0,020 & 0,004 & 0,002 & 0 & 0 & 0,001 & 0 & 0 & 0 \\ 0,010 & 0,013 & 0,007 & 0,001 & 0,002 & 0 & 0 & 0,001 & 0 & 0 \\ 0,023 & 0,032 & 0,020 & 0,015 & 0,008 & 0 & 0 & 0 & 0,001 & 0 \\ 0,101 & 0,147 & 0,103 & 0,100 & 0,085 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,001 \end{bmatrix};$$

• для $K_{\mu}(s)$:

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{A}_c = \\
 & \begin{bmatrix} -4,266 & 0,421 & 0,276 & 0,543 & 0,167 & -0,490 & 0,179 & 0,669 & -0,648 & -0,372 \\ 0 & -0,882 & 1,276 & -0,196 & 0,180 & 0,408 & -0,161 & -1,064 & 0,143 & -0,417 \\ 0 & -0,188 & -0,882 & 0,150 & -0,185 & 0,232 & -0,815 & 0,274 & -0,181 & 0,190 \\ 0 & 0 & 0 & -0,116 & -0,028 & 0,041 & 0,003 & 0,013 & 0,131 & 0,017 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,619 & -0,982 & -0,263 & 0,004 & 0,107 & -0,274 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0105 & -0,619 & 0,016 & 0,001 & -0,133 & -0,058 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,708 & 0,054 & 0,103 & -0,016 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,928 & -0,708 & -0,139 & -0,136 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,500 & -0,491 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,600 \end{bmatrix}, \\
 & \mathbf{B}_c = \\
 & \begin{bmatrix} -0,017 & -0,025 & -0,442 & -0,022 & -0,008 \\ -0,175 & -0,125 & 0,004 & -0,110 & -0,236 \\ -0,080 & -0,081 & 0,008 & -0,111 & 0,189 \\ -0,028 & 0,050 & 0,047 & 0,009 & 0,002 \\ 0,154 & 0,118 & -0,001 & -0,037 & 0,033 \\ 0,263 & 0,059 & -0,001 & 0,024 & 0,028 \\ -0,079 & -0,108 & 0,001 & -0,226 & -0,039 \\ -0,064 & -0,166 & 0,001 & -0,175 & -0,149 \\ -0,022 & -0,037 & 0,001 & -0,051 & -0,010 \\ -0,018 & 0,153 & -0,001 & -0,043 & -0,021 \end{bmatrix}, \\
 & \mathbf{C}_c = \\
 & \begin{bmatrix} 0,003 & 0,001 & 0,016 & 0,003 & 0,045 & 0,047 & 0,010 & 0,003 & 0,031 & 0,020 \\ 0,008 & 0,004 & 0,028 & 0,004 & 0,072 & 0,075 & 0,014 & 0,001 & 0,019 & 0,047 \\ 0,020 & 0,012 & 0,026 & 0,004 & 0,043 & 0,043 & 0,013 & 0,005 & 0,012 & 0,034 \\ 0,005 & 0,043 & 0,103 & 0,017 & 0,078 & 0,085 & 0,066 & 0,006 & 0,001 & 0,038 \\ 0,233 & 0,292 & 0,406 & 0,008 & 0,137 & 0,175 & 0,230 & 0,293 & 0,044 & 0,029 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

Анализ результатов моделирования

Моделирование систем с различными регуляторами выполнялось при следующих условиях: $\Delta(s)$ — матричная передаточная функция 5-го порядка (порядка объекта), параметры которой генерировались случайным образом с учетом ограничения $\|\Delta\|_{\infty} < 1$; $\mathbf{W}(s)$ — диагональная матричная передаточная функция, по диагонали которой расположены передаточные функции $W(s) = \frac{0,5s}{s+20}$. Результаты моделирования робастной системы управления при различных регуляторах относительно возмущений вида $w_i(t) = 0,01 \sin(t)/(1+t)$ и $w_i(t) = 2$ представлены соответственно на рис. 2, 3, а относительно изменения задания $r_i(t)$ ступенчатого вида — на рис. 4, где a — $\varepsilon(t)$ и b — $u(t)$. Сплошной линией показаны переходные процессы в номинальной системе, а пунктирной линией — в системе при наихудших комбинациях неопределенностей. Последние получены итерационным методом путем комбинации неопределенностей в заданных пределах, при значениях которых амплитудно-частотная характеристика системы имеет максимальное значение. Как видно из графиков переходных процессов, система хорошо подавляет входное возмущение, ограниченное

в L_2 -норме при заданном диапазоне его изменения. При возмущении, ограниченном в L_∞ -норме, наблюдается статическая ошибка, которая в системе с $K_P(s)$ - и $K_{PK}(s)$ -регуляторами довольно существенная. Кроме того, в статических регуляторах переходные процессы имеют колебательный характер, а система при наилучших возмущениях выходит на границу устойчивости.

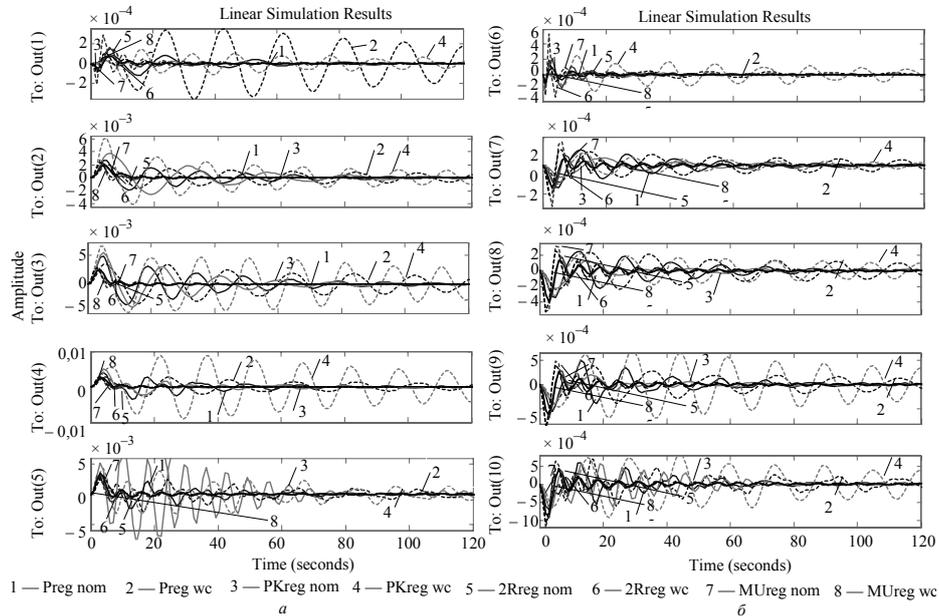


Рис. 2

При отслеживании входных задающих сигналов различного вида наблюдаются такие же показатели переходных процессов. Во всех экспериментах переходные процессы в системе с $K_{2R}(s)$ - и $K_\mu(s)$ -регуляторами имеют апериодический характер и несущественно отличаются как при номинальном объекте, так и при наилучших неопределенностях. Вектор управляющих воздействий не выходит за свои естественные ограничения.

Таким образом, наилучшими с точки зрения подавления внешних возмущений, отслеживания входного задания при неопределенностях в МВУ, а также при минимуме критерия (4) оказалась система с $K_{2R}(s)$ - и $K_\mu(s)$ -регуляторами.

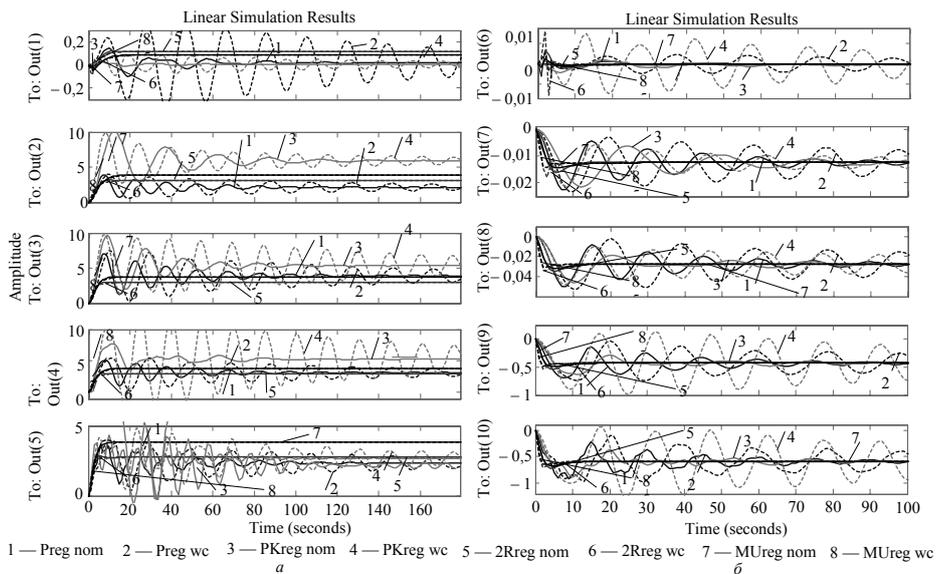


Рис. 3

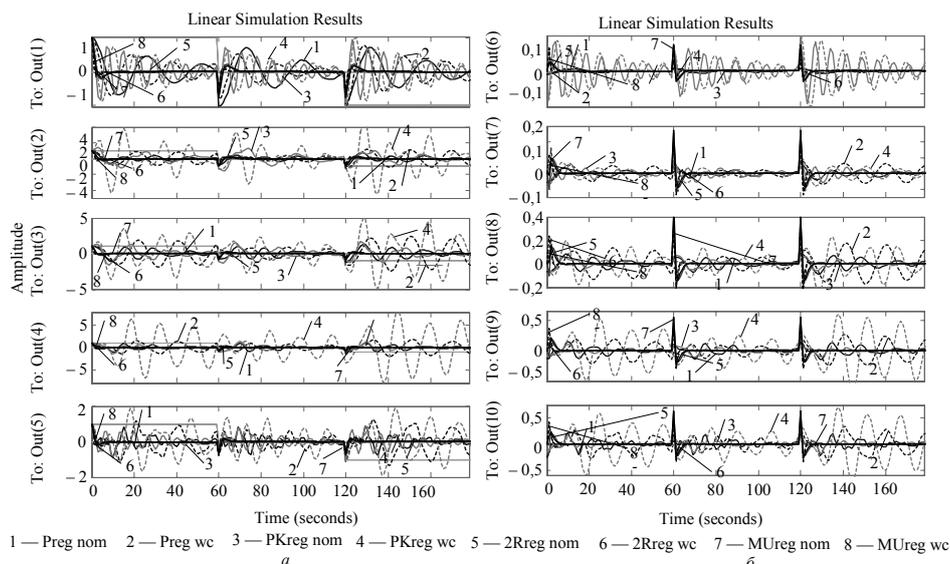


Рис. 4

Способы реализации микропроцессорной системы управления

Реализацией робастных систем управления является разработка исполнительной программы на средствах микропроцессорной техники, при этом передаточная функция $K(s)$ предварительно преобразуется в дискретный вид. Однако эта система будет работать удовлетворительно только в одном режиме, при котором разрабатывался регулятор. Технологические процессы на непрерывном производстве, как правило, функционируют в одном режиме, исключение составляет пуск и остановка технологической линии, поэтому указанная реализация эффективна для них [5].

Для технологических объектов, которые характеризуются множеством состояний функционирования, в [6] предложена структура с переключением, при этом в каждом режиме рассчитан оптимальный робастный регулятор для своей математической модели объекта.

Еще одним вариантом реализации робастного регулятора может быть адаптивная система с эталонной моделью, при этом робастный регулятор служит для расширения границ робастности, а блок адаптации — для улучшения качества переходных процессов. Как показано в [7], в блок адаптации, кроме номинальной модели объекта, включена также нейросеть, которая на основе рассогласования между выходом объекта и модели формирует дополнительный сигнал управления, который вычитается из основного управляющего сигнала с выхода робастного регулятора.

Заключение

Технологические объекты управления функционируют в условиях неопределенности, которая обусловлена неточностью описания упрощенной математической модели объекта, изменением параметров модели в процессе работы, нелинейностью датчиков и исполнительных механизмов, поэтому для эффективного управления ими необходимо использовать робастные регуляторы. Кроме того, технологические объекты работают в условиях действия внешних возмущений, а сигнал задания не всегда имеет постоянное значение, поэтому в контуре управления целесообразно использовать рассогласование по сигналу ошибки. Если область неопределенности значительная, то возникает необходимость синтеза робастных регуляторов по существующим сложным теоретическим алгоритмам робастного управления. Однако область робастности можно существенно увеличить, если использовать традиционные локальные регуляторы, параметры которых рассчитаны по критерию (4). Для улучшения качества переходных процессов в переходных режимах в микропроцессорной структуре управления с робастным регулятором можно использовать адаптивные, нейросетевые и другие структуры.

От рецензента. Материалы статьи показывают, что для решения поставленной в ней задачи по существу не понадобился какой-то «особый» подход к проектированию регулятора, который требует учета определенных особенностей конкретного технологического процесса, указанных ее авторами: такое проектирование можно осуществить прямым использованием известных инструментальных средств в пакетах Matlab, не прибегая к какой-либо их модификации. Однако сомнения рецензента вызывают лишь неожиданные появления кратковременных всплесков управляющих воздействий на 50-й и 120-й секундах в одном из модельных экспериментов (см. рис. 4, б) при отсутствии подобных всплесков ошибки системы (см. рис. 4, а).

Н.М. Луцька, А.П. Ладанюк

ОСОБЛИВОСТІ ЗАДАЧ РОБАСТНОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ. Частина 2. ПРИКЛАДИ МОДЕЛЮВАННЯ РОБАСТНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

Розглянуто питання розробки та моделювання системи керування з робастними регуляторами, синтезованими за різними алгоритмами. На основі математичної моделі об'єкта керування для багатокорпусної випарної установки, яка наведена в першій частині статті, синтезовано чотири робастних регулятори за 2-Ріккати підходом, алгоритмами μ -синтезу та негладкої оптимізації. Наведено порівняльні результати моделювання, а також переваги та недоліки кожної з розроблених систем.

N.N. Lutskaaya, A.P. Ladanyuk

FEATURES OF TASKS OF ROBUST PROCESS CONTROL. Part 2. EXAMPLES OF MODELING OF ROBUST CONTROL SYSTEMS

The development and simulation of control systems with robust controls that are synthesized by different algorithms are considered. Based on the mathematical model of the plant for multiple-evaporator, shown in the first part of the article there synthesized four robust regulators by 2-Riccati approach, algorithms of μ -synthesis and non-smooth optimization. The comparative results of the simulation, as well as the advantages and disadvantages of each of the systems developed are presented.

1. *Ладанюк А.П., Луцька Н.Н.* Особенности задач робастного управления технологическими объектами. Часть 1. Технологические объекты и их математические модели // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». — 2016. — № 5. — С. 16–23.
2. *Поляк Б.Т., Щербаков П.С.* Робастная устойчивость и управление. — М.: Наука, 2002. — 303 с.
3. *Ricardo S. Sánchez-Peña and Mario Sznaiier.* Robust systems: theory and applications. — New York: John Wiley, 1998. — 490 p.
4. *Arkarian P., Noll D., Alazard D.* Controller design via nonsmooth multi-directional search // IFAC Conf. on System Structure and Control. — Oaxaca, Mexico, Dec., 2004.
5. *Луцька Н.М., Ладанюк А.П.* Оптимальні та робастні системи керування технологічними об'єктами. — Київ: Ліра-К, 2015. — 288 с.
6. *Тимченко В.Л.* Робастно-оптимальные системы динамического позиционирования морских подвижных объектов // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ. Москва, 16–19 июня 2014. — 2014. — С. 3597–3605.
7. *Бублик Г.Ф., Збруцький О.В., Мелашенко О.М., Рижков Л.М.* Робастна та нейроадаптивна стабілізація штучних супутників Землі. — Київ: НТУУ «КПІ», 2013. — 195 с.

*Получено 08.02.2016
После доработки 03.06.2016*