

УДК 681.513.5:664.12

Н.Н. Луцкая, А.П. Ладанюк

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ МНОГОМЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

При автоматизации многомерных технологических объектов часто возникает задача стабилизации технологического режима, что проявляется в необходимости регулирования несколько взаимосвязанных переменных. В настоящее время эта задача решается двумя путями: использование нескольких автоматических регуляторов для каждой переменной либо создание одного многомерного регулятора.

Данная работа посвящена вопросам использования оптимальных многомерных регуляторов для сложных технологических объектов, включая линейно-квадратичный с гауссовскими возмущениями (LQG), H_2 -, H_∞ -регуляторы. Выбор этих регуляторов определяется общностью математического аппарата их синтеза и использованием математических моделей в пространстве состояний.

В последнее время в литературе появилось много разработок, связанных с указанной тематикой, в основном в аэрокосмической промышленности. Поэтому в данной работе основы математического аппарата синтеза упущены (их можно найти в [1, 2, 3]), а основное внимание уделено возможностям использования указанных регуляторов для непрерывных технологических объектов, их сравнению при моделировании, а также проблемам, возникающим при внедрении.

Развитие автоматизации объектов непрерывного производства, в частности пищевой промышленности идет, по пути внедрения микропроцессорной техники, при этом основное внимание уделяется информационному обеспечению, а не внедрению новых способов и алгоритмов управления. Это связано с технологическими требованиями к современным системам автоматизации, а также потому, что ведение процесса и принятие решений все еще доверено оператору. К тому же, использование новых алгоритмов связано с трудоемкой работой – выбор дополнительного программного обеспечения, написание и отладка программы, поддержание работоспособности системы на длительном интервале ее работы, что ведет к ее удорожанию и не окупается экономически. Поэтому, на предприятиях с непрерывным производством внедрение систем автоматизации ограничивается, как правило, использованием одноконтурных систем регулирования (ПИД-регуляторы), логического регулирования, многоконтурных систем и некоторых адаптивных алгоритмов, например, для настройки регуляторов.

В работе рассматривается класс объектов с n регулируемыми переменными, для которых целесообразно использование одного многомерного регулятора.

Первым этапом при синтезе многомерных регуляторов является выбор объекта и оценка особенностей регулирования. На основе теоретических и экспериментальных данных, сделан вывод, что такие регуляторы целесообразно применять для технологических объектов, где регулируются взаимосвязанные параметры. Поэтому выделен класс объектов со следующими характеристиками [4].

- Имеется $n \geq 4$ координат состояния одной физической природы. При меньшем количестве координат состояния рекомендуется применять более простые регуляторы. Верхняя граница не определена, но нужно помнить, что увеличение размерности вектора состояния увеличивает размерность регулятора и скорость пересчета его параметров, что в реальном времени может приводить к значительному запаздыванию.
- Имеются внутренние взаимосвязи между переменными. Необходимо отметить, что данная взаимосвязь должна быть существенной и взаимной, например, одна координата состояния влияет на большее количество переменных объекта. Также стоит учесть, что несоразмерность коэффициентов взаимосвязи координат состояния влияет на разброс коэффициентов регулятора.
- Математическая модель описывается однотипными уравнениями, то есть при выводе уравнений использован один логический подход.
- Существующие локальные системы регулирования одинаковы.

К этому классу объектов отнесен ряд подсистем пищевой промышленности, например, подсистема регулирования уровней в многокорпусной выпарной установке сахарного завода и сборников до и после нее, подсистема регулирования температур в наклонной диффузионной установке (НДУ). Далее в качестве объекта регулирования будет рассматриваться подсистема регулирования температур НДУ.

Так как каждый LQG, H_2 -, H_∞ -оптимальный регулятор основан на математической модели, представленной в пространстве состояний, то вторым этапом синтеза является построение модели выбранного объекта.

На основе тепловых балансов с учетом некоторых допущений выведена линейная математическая модель подсистемы НДУ по температурам (машинное время $\tau = 100t$, где τ , с)

$$\left\{ \begin{array}{l} 1.157 \frac{d\Delta\theta_1}{dt} + \Delta\theta_1 = 0.43\Delta\theta_c + 0.54\Delta\theta_2 + 0.03\Delta\theta_{n1} - 0.27\Delta G_c + 0.15\Delta G_{dc}; \\ 1.169 \frac{d\Delta\theta_2}{dt} + \Delta\theta_2 = 0.43\Delta\theta_1 + 0.54\Delta\theta_3 + 0.03\Delta\theta_{n2} - 0.14\Delta G_c + 0.04\Delta G_{dc}; \\ 1.181 \frac{d\Delta\theta_3}{dt} + \Delta\theta_3 = 0.43\Delta\theta_2 + 0.54\Delta\theta_4 + 0.03\Delta\theta_{n3} - 0.04\Delta G_c + 0.03\Delta G_{dc}; \\ 1.193 \frac{d\Delta\theta_4}{dt} + \Delta\theta_4 = 0.43\Delta\theta_3 + 0.33\Delta\theta_b + 0.03\Delta\theta_{n4} + 0.21\Delta\theta_g + 0.92\Delta G_b + \\ \quad + 0.92\Delta G_g - 0.87\Delta G_{dc} + 0.09\Delta G_c; \\ 0.0887 \frac{d\Delta\theta_{n1}}{dt} + \Delta\theta_{n1} = \Delta\theta_1 + 279.91\Delta G_{n1}; \\ 0.0393 \frac{d\Delta\theta_{n2}}{dt} + \Delta\theta_{n2} = \Delta\theta_2 + 288.9\Delta G_{n2}; \\ 0.0489 \frac{d\Delta\theta_{n3}}{dt} + \Delta\theta_{n3} = \Delta\theta_3 + 286.5\Delta G_{n3}; \\ 0.0715 \frac{d\Delta\theta_{n4}}{dt} + \Delta\theta_{n4} = \Delta\theta_4 + 282.3\Delta G_{n4}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Поставленная задача решается с использованием математической модели в пространстве состояний

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax(t) + Bu(t) + Gw(t); \\ y_v &= Cx(t) + Du(t) + Hw(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где векторы модели составляют:

$$x = [\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_{n1}, \Delta\theta_{n2}, \Delta\theta_{n3}, \Delta\theta_{n4}]^T - \quad (3)$$

вектор координат состояния, состоящий из температур сокостружечной смеси и пара в паровых камерах четырех зон аппарата соответственно;

$$u = [\Delta G_{n1}, \Delta G_{n2}, \Delta G_{n3}, \Delta G_{n4}]^T - \quad (4)$$

вектор управления – расход пара в зонах аппарата;

$$w = [\Delta\theta_c, \Delta G_c, \Delta G_{dc}, \Delta\theta_b, \Delta\theta_g, \Delta G_b, \Delta G_g]^T - \quad (5)$$

вектор возмущений, где $\Delta G_c, \Delta G_{dc}, \Delta G_b, \Delta G_g$ - расходы стружки, диффузионного сока, барометрической и жомпрессовой воды соответственно, $\Delta\theta_c, \Delta\theta_b, \Delta\theta_g$ - температуры стружки на входе в диффузионный аппарат, барометрической и жомпрессовой воды соответственно;

$$y_v = [\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4]^T - \quad (6)$$

вектор выходов (измерений) – температуры сокостружечной смеси в соответствующих зонах аппарата.

Матрицы постоянных коэффициентов A, B, C, D, G, H в (2) выводятся на основе модели (1).

На третьем этапе, основываясь на теории синтеза LQG, H_2 -, H_∞ -регуляторов рассчитываются параметры A_c, B_c, C_c , оптимального многомерного регулятора со структурой

$$\begin{aligned} \frac{dx_c(t)}{dt} &= A_c x_c(t) + B_c y_v(t); \\ u(t) &= C_c x_c(t). \end{aligned} \quad (7)$$

Для проведения моделирования и сравнения LQG, H_2 -, H_∞ -регуляторов выбираются следующие условия изменения возмущений. На основе промышленных данных проведен статистический анализ переменных выбранного объекта и сделан вывод, что все возмущения объекта являются случайными сигналами, и периодически возникают штатные ситуации, когда возмущения имеют детерминированную составляющую. Поэтому при моделировании в качестве возмущений выбраны следующие сигналы:

- белый шум;
- случайный сигнал, распределенный за нормальным законом;
- детерминированный сигнал;
- случайный сигнал, содержащий детерминированную составляющую.

Кроме этого, моделирование ведется для таких случаев:

- при номинальных характеристиках возмущений, то есть в виде белого шума и случайного сигнала с дисперсией, рассчитанной при статистическом анализе реального объекта и детерминированного сигнала с 20%-ым превышением номинального;
- при номинальных/измененных характеристиках возмущений и (или) номинальных/измененных параметрах математической модели (20%).

Также учитывается случайный аддитивный сигнал (белый шум) по каналам измерений, рассчитанный при статистическом анализе и случайный мультипликативный сигнал с малой интенсивностью.

Результаты компьютерного моделирования представлены на рис.1-3, в качестве возмущений использованы случайные процессы отражающие изменение нагрузки (вектор $w(t)$). Критерием оценки качества регулирования и сравнения различных регуляторов выбрана дисперсия переходных процессов при стабилизации температур сокостружечной смеси.

При возмущении – белый шум (рис.1) лучшие переходные процессы имеет система управления с H_2 - и H_∞ -регуляторами, причем H_2 -регулятор имеет лучшие показатели

качества переходных процессов как в случае с номинальными характеристиками возмущений, так и с измененными.

При возмущениях в виде случайного сигнала с нормальным распределением (рис.2) наблюдаются те же зависимости.

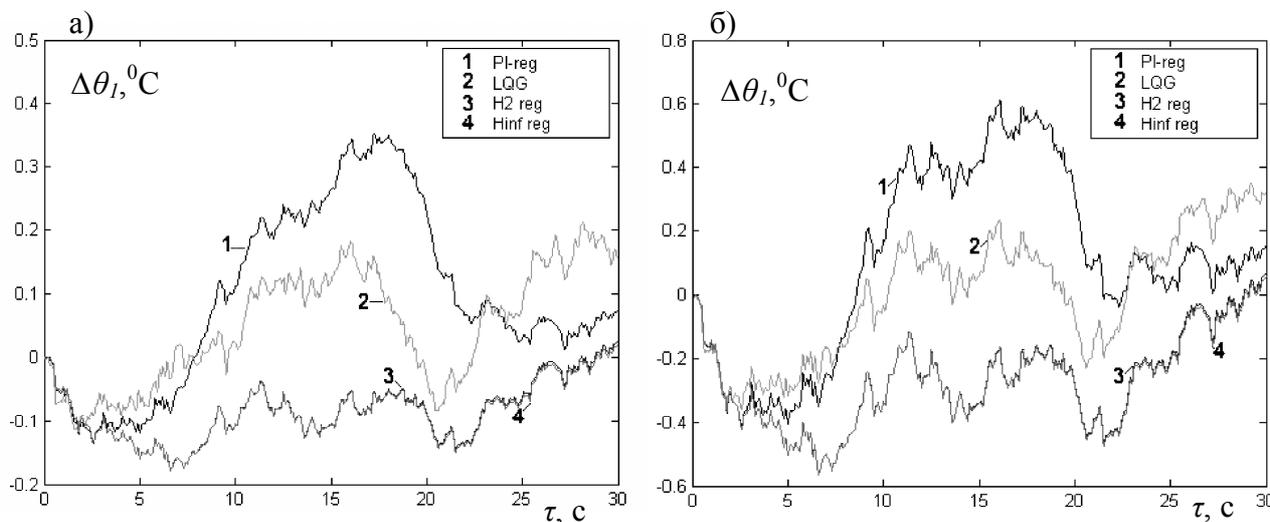


Рис.1. Переходные процессы регулирования температуры сокоотружечной смеси в первой зоне НДУ при возмущениях – белый шум с а) – номинальными и б) - измененными характеристиками возмущений.

При детерминированном возмущении и случайном возмущении, содержащем детерминированную составляющую (рис.3) ситуация изменяется: в системе с ПИ- и LQG-регулятором переходные процессы имеют случайный (колебательный) характер за счет существенной помехи по каналам измерения; в системе с H_2 - и H_∞ -регуляторами переходные процессы имеют значительную статическую погрешность, меньшую колебательность, в чем проявляется определенная грубость (робастность) системы.

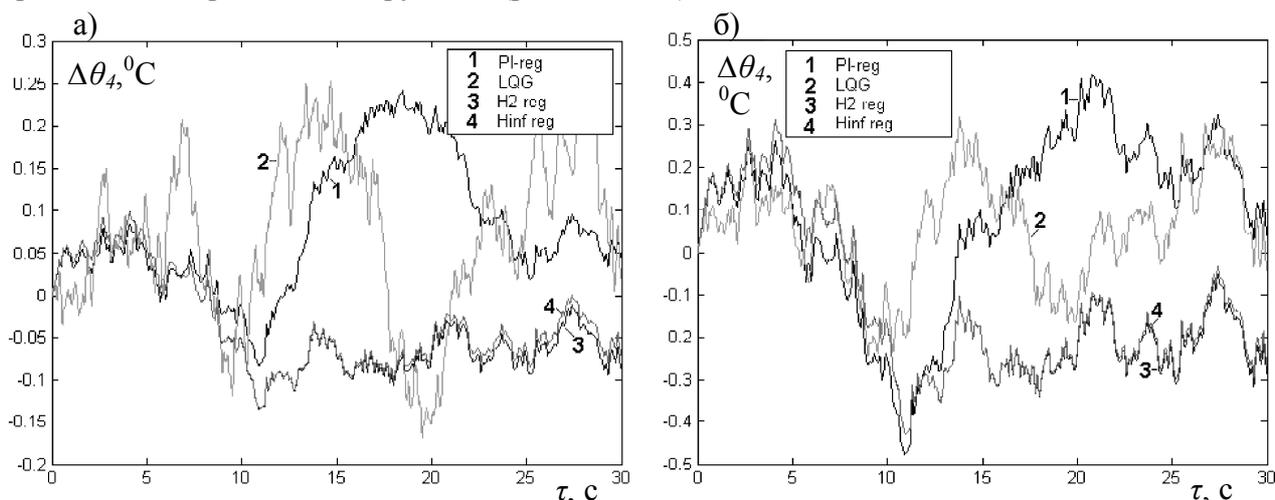


Рис.2. Переходные процессы регулирования температуры сокоотружечной смеси в четвертой зоне НДУ при случайных возмущениях с а) – номинальными и б) - измененными характеристиками возмущений.

При учете нелинейностей в системе автоматического регулирования с возмущениями в виде белого шума наблюдается ухудшение качества переходных процессов, которые в

некоторых случаях являются расходящимися, что требует изменения настроек локальных регуляторов. Лучшей остается система с H_2 -регулятором, а сигнал управления при этом минимален в системе с H_∞ -регулятором в соответствии с критерием минимизации. Постоянные перемещения регулирующего органа в системе с LQG-регулятором приводят к увеличению расхода пара, что уменьшает экономический эффект при регулировании. Система с H_2 -регулятором имеет преимущество по сравнению с системой с ПИ-регулятором (экономия энергоресурсов).

При ступенчатых возмущениях с учетом нелинейностей переходные процессы в системе с H_2 - и H_∞ -регуляторами имеют статическую погрешность, причем в H_∞ -системе она меньше. Соотношение качества управления такое же, как и в предыдущем случае.

При случайных возмущениях, содержащих детерминированную составляющую с учетом нелинейностей лучшие переходные процессы, но худшие энергетические затраты имеет система с LQG-регулятором, при этом переходные процессы с H_2 - и H_∞ -регуляторами имеют статические погрешности, хотя энергетические затраты их минимальные.

На основании результатов моделирования выделены следующие условия, преимущества и недостатки каждой из систем с различными регуляторами.

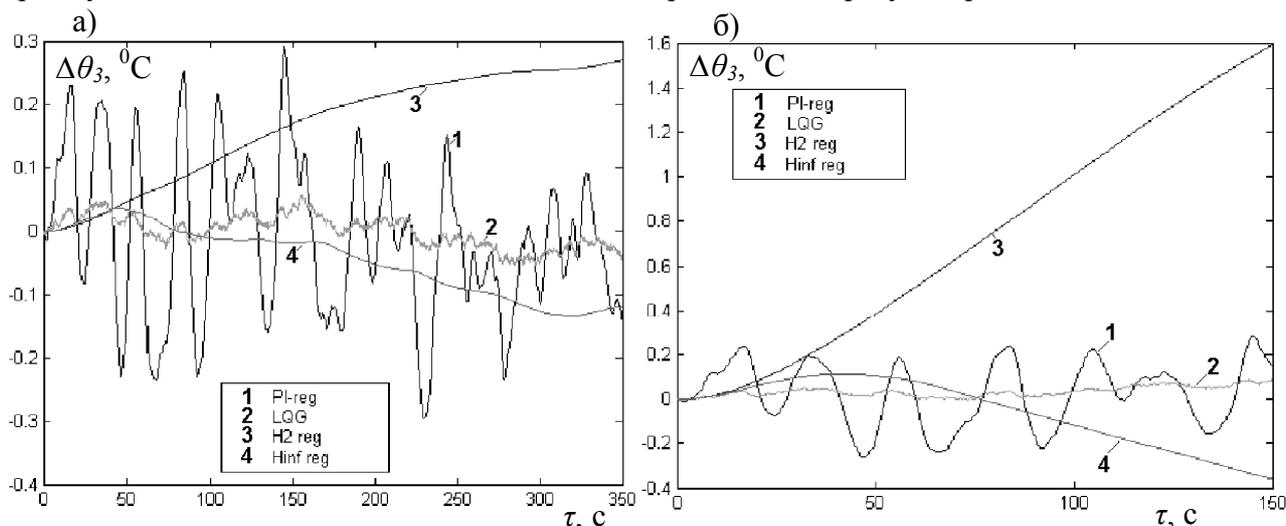


Рис.3. Переходные процессы регулирования температуры сокоотружечной смеси в третьей зоне НДУ при а) - детерминированном возмущении и б) - возмущении случайный сигнал, содержащий детерминированную составляющую.

LQG:

условия: возмущение - белый шум с определенными характеристиками, математическая модель четко описывает процесс;

преимущества: улучшение качественных характеристик переходных процессов как при случайных, так и детерминированных возмущениях;

недостатки: интенсивные затраты на управление.

H2:

условия: возмущение - белый шум, параметры математической модели могут изменяться в рабочем диапазоне;

преимущества: улучшение качественных характеристик переходных процессов при случайных возмущениях, минимальные затраты на управление;

недостатки: ухудшение качественных характеристик переходных процессов при детерминированных возмущениях.

H_{∞} :

условия: возмущение - детерминированное, математическая модель аддитивно и (или) мультипликативно возмущенная;

преимущества: улучшение качественных характеристик переходных процессов при случайных и детерминированных возмущениях, минимальные затраты на управление;

недостатки: затягивает переходные процессы при детерминированных возмущениях.

Внедрение рассмотренных регуляторов (7) для выделенного класса объектов требует использования цифровых алгоритмов, что реализуется в современных микропроцессорных системах по-разному: на микроконтроллерах (однокристальные микроконтроллеры), на IBM совместимых контроллерах с помощью языков программирования C, C++, Pascal, Assembler, Basic (контроллеры ICP DAS фирмы ICP CON, ADAM фирмы Advantech), на IBM совместимых контроллерах со встроенным ядром Soft Logic (ISA GRAF, Trace Mode, LabView), на PLC (программируемые логические контроллеры), на любых указанных технических средствах с использованием персонального компьютера (PC), в котором функционирует SCADA-программа или (и) прикладная программа, на PC со встроенными функциями управления и SCADA, на указанных технических средствах включая системы управления базами данных. При выборе технических и программных средств также учитывается их инерционность, гибкость, наличие технологического языка программирования и графического интерфейса и т.д. Также стоит учесть уровень автоматизации и технические средства конкретного технологического комплекса, что поможет не создавать отдельный модуль автоматизации выделенных подсистем, а встроить рассмотренные алгоритмы в существующую систему.

Выводы:

- существуют объективные условия возможности применения многомерных оптимальных регуляторов (LQG , H_2 , H_{∞}) для технологических объектов со взаимосвязанными координатами, работающих в условиях случайных возмущений;
- моделирование систем с названными регуляторами показало возможность уменьшения суммарной энергии ошибки регулирования;

- современные технические средства позволяют реализовать названные регуляторы в составе автоматизированной системы управления технологическими комплексами.

1. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С. III. Оптимальное управление системами: Пер. с англ./ Под ред. Б.Р. Левина. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с., ил. – (Второе изд.: США, 1979).
2. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления. – М.: Изд-во МГТУ, 2001. – 744с.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т. 3: Методы современной теории автоматического управления / под ред. Н. Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 748 с.
4. Луцька Н.М. Синтез оптимальних регуляторів для систем автоматизації технологічних комплексів неперервного типу // Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси і системи. – 2005, № 1 (15). – 148-151 с.