

Для проверки соответствия разработанных аппаратно-программных средств требованиям технического задания проведено их тестирование на испытательном стенде. В реальных условиях функционирования загрузка каналов модуля при вводе данных составляет $\leq 15...17\%$, при выводе данных – $\leq 2...3\%$, при этом потери данных не наблюдалось. Испытания подтвердили работоспособность системы и показали, что при 90% общей загрузки в сети не происходит потери кадров. Таким образом, данная система может быть использована в составе АСУТП АЭС.

Список литературы

1. Industrial Ethernet – наиболее используемая промышленная шина 2003 г. // Автоматизация в промышленности. 2004. №7.

Кишкин В.Л. – к.т.н., первый зам. главного конструктора, Новиков А.А. – начальник лаборатории, Еремин Ю.А. – с.н.с., Смирнов В.В. – с.н.с., Белова Т.Н. – главный специалист (ВНИИАвтоматики), Шагурин И.И. – д.т.н., профессор, Смирнов А.В. – инженер, Мокрецов М.О. – ассистент, Тихонов Ю.Н. – аспирант МИФИ.

Контактный телефон: (095)324-01-84. E-mail: motlab@d406.micro.mephi.ru

СИНТЕЗ РОБАСТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В КАСКАДНОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ

А.М. Джараган, В.В. Сыроквашин, А.Л. Фокин, В.Г. Харазов (СПбГТУ)

Рассмотрен синтез робастной системы управления с каскадной структурой, осуществляющийся без традиционной для этих систем итерационной процедуры проектирования. Это достигается за счет использования виртуального управления, что позволяет синтезировать внутренний и внешний контуры по отдельности. Рассмотрены методы робастного синтеза регуляторов стабилизации для этих контуров с учетом специфики их работы.

Каскадная структура системы управления часто используется при автоматизации ТП. Такие системы возникают, когда при наличии одного управления имеется возможность измерения двух и более переменных процесса. Это увеличивает количество информации о процессе, что позволяет улучшить качество регулирования и увеличить быстродействие системы.

Рассмотрим каскадную систему, показанную на рис. 1. Она имеет один вход \bar{y} и один выход y , а также промежуточную переменную z . На основании измерения пары (z, y) формируется управление u , которое реализуется при помощи двух регуляторов: внутреннего контура с передаточной функцией $W_{p1}(p)$ и внешнего контура с передаточной функцией $W_{p2}(p)$.

Наличие двух регуляторов при одном управляющем сигнале определяет специфику синтеза системы управления. Традиционно [1] используется итерационная процедура проектирования. На каждом этапе рассматривается одноконтурная система с одним регулятором для эквивалентного объекта, передаточная функция которого включает передаточную функцию смежного регулятора, полученного на предыдущем этапе. Это усложняет процедуру проектирования. Поэтому обычно заранее задаются структурой регуляторов, а итерационную процедуру используют для параметрического синтеза.

Синтез каскадной системы

Если в передаточных функциях объекта $W_{01}(p), W_{02}(p)$ присутствует неопределенность, то синтез осуществляет-

2. Технические предложения по модернизации шинной системы ТПТС51, ВНИИА, 2003.
 3. *Кругляк К.В.* Локальные сети Ethernet в АСУТП: быстрее, дальше, надежнее // Современные технологии автоматизации. 2003. №1.
 4. *Шагурин И.И.* Современные микроконтроллеры и микропроцессоры Motorola. М.: Горячая линия. Телеком. 2004.
 5. *Мосолкин С.И., Промыслов В.Г., Жарко Е.Ф. и др.* Системное ПО LICS как компонент подсистем АСУТП АЭС // Автоматизация в промышленности. 2004. №10.
 6. *Шагурин И.И., Ванюлин В.А., Смирнов А.В.* Исполнительное ядро реального времени RTEMS и особенности его применения // Мир компьютерной автоматизации. 2001. №4.
 7. Патент №2239228 (РФ) Способ распределения времени центрального процессора между задачами в АСУТП / Еремин Ю.А., Кишкин В.Л. // Бюл. 2004. №30.

ся в классе робастных регуляторов, которые в большинстве случаев являются более сложными, чем традиционные. Поэтому актуальна задача построения процедуры проектирования без итераций. Для синтеза будем использовать номинальные передаточные функции объекта $W_{01}^0(p), W_{02}^0(p)$, которые считаются известными. Сначала рассмотрим внешний контур регулирования.

Для построения безытерационной процедуры проектирования воспользуемся идеей построения виртуального регулятора [2], который обеспечивает требуемое поведение замкнутой по входу z системы с передаточной функцией объекта $W_{02}^0(p)$. Пусть желаемое движение по переменной y обеспечивается при регулировании по закону

$$z(p) = W_b(p) \cdot 2(p), \tag{1}$$

где $W_b(p)$ – передаточная функция виртуального регулятора.

Тогда для номинального объекта в соответствии со структурной схемой на рис. 1 получим

$$z(p) = W_{01}^0(p) \cdot W_{p1}(p) \cdot [\bar{z}(p) - z(p)],$$

$$\bar{z}(p) = W_{p1}(p) \cdot \varepsilon_2(p)$$

Отсюда
$$z(p) = \frac{W_{01}^0(p) \cdot W_{p1}(p) \cdot W_{p2}(p)}{1 + W_{01}^0(p) \cdot W_{p1}(p)} \cdot \varepsilon_2(p). \tag{2}$$

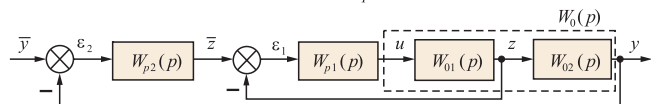


Рис. 1

Приравнявая правые части в (1), (2), получим

$$W_{p2}(p) = W_B(p) \cdot \frac{1 + W_{01}^0(p) \cdot W_{p1}(p)}{W_{01}^0(p) \cdot W_{p1}(p)} = W_B(p) \cdot [\Phi_1^0(p)]^{-1}, \quad (3)$$

где $\Phi_1^0(p)$ – номинальная передаточная функция внутреннего замкнутого контура.

Из (3) видно, что передаточная функция регулятора внешнего контура содержит элемент, компенсирующий динамику внутреннего контура. Это возможно только, если передаточная функция $\Phi_1^0(p)$ будет устойчивой и минимально фазовой.

Отметим, что компенсация динамики внутреннего контура дает возможность увеличивать быстродействие системы тем в большей степени, чем значительно инерционность передаточной функции $W_{01}(p)$. С другой стороны компенсация снижает грубость всей системы к наличию неопределенности в задании передаточных функций $W_{01}(p)$, $W_{02}(p)$. На качество компенсации влияет относительная степень (разница между порядками полиномов в знаменателе и числителе) передаточной функции $W_{01}(p)$. Хорошие результаты получаются, если она невысока.

Синтез внешнего контура

Так как передаточная функция $W_{01}(p)$ реального объекта отличается от своего номинального аналога $W_{01}^0(p)$, то полная компенсация динамики внутреннего контура становится невозможной. В результате передаточная функция разомкнутого контура будет иметь вид

$$W(p) = W_{p2}(p) \cdot \Phi_1(p) \cdot W_{02}(p) = W_B(p) \cdot [\Phi_1^0(p)]^{-1} \cdot \Phi_1(p) \cdot W_{02}(p), \quad (4)$$

где
$$\Phi_1(p) = \frac{W_{p1}(p) \cdot W_{01}(p)}{1 + W_{p1}(p) \cdot W_{01}(p)}$$

передаточная функция замкнутого внутреннего контура реальной системы с неопределенностью.

Следовательно, передаточная функция виртуального регулятора $W_B(p)$ синтезируется на основании номинальной передаточной функции объекта $W_{02}^0(p)$, а реально ей соответствует новая передаточная функция, полученная после компенсации внутреннего контура

$$\hat{W}_{02}(p) = [\Phi_1^0(p)]^{-1} \cdot \Phi_1(p) \cdot W_{02}(p). \quad (5)$$

Поэтому синтез $W_B(p)$ происходит при наличии неструктурированной неопределенности, которая может присутствовать в передаточной функции $W_{02}(p)$, а также возникающей из-за неточной компенсации динамики внутреннего контура $\Phi_1(p)$.

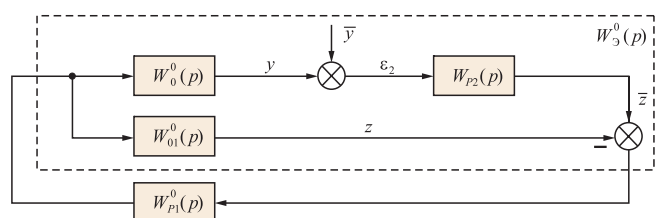


Рис. 2

Такая задача может, например, решаться в рамках H^∞ теории [3] при соответствующей постановке задачи для внешнего контура. Но можно воспользоваться классическими методами [4], позволяющими более просто осуществить всю процедуру синтеза при наличии запаздывания в передаточных функциях. Если, например, номинальная передаточная функция $W_{02}^0(p)$ может быть представлена в виде

$$W_{02}^0(p) = \frac{k_{02}^0 \cdot \exp(-\tau_0 \cdot p)}{T_{02}^0 p + 1}, \quad (6)$$

то передаточная функция виртуального робастного регулятора, обеспечивающая астатизм внешнего контура, будет иметь третий порядок и может быть записана в форме

$$W_B(p) = \frac{\omega_c}{k_{02}^0} \cdot \frac{T_{02}^0 p + 1}{p} \cdot d \cdot \frac{T'' p + 1}{T' p + 1} \cdot \frac{T_1 p + 1}{T_\Delta p + 1}, \quad (7)$$

где $\omega_c = 0,343/\tau_0$, $T' \leq (19 \omega_c)^{-1}$, $T'' = 19 T'$, $T_1 = \omega_1^{-1}$, $\omega_1 > \omega_c$, $T_\Delta > T_1$, $d < 1$ – настраиваемые параметры.

Эта передаточная функция получена после введения дополнительного корректирующего элемента для увеличения "грубости" управления

$$W_K(p) = d \cdot \frac{T'' p + 1}{T' p + 1} \cdot \frac{T_1 p + 1}{T_\Delta p + 1}, \quad (8)$$

к ПИ закону регулирования

$$W_{ПИ}(p) = \frac{\omega_c}{k_{02}^0} \cdot \frac{T_{02}^0 p + 1}{p}, \quad (9)$$

обеспечивающего заданное качество регулирования. Так, что $W_B(p) = W_{ПИ}(p) \cdot W_K(p)$.

Формула (7) определяет структуру регулятора и величину ω_c . Величина ω_1 берется несколько больше ω_c (до 50%). Величина $d < 1$ подбирается таким образом, чтобы в синтезированной системе частота среза ω_c' находилась в окрестности величины ω_c из (7). Величины $T_\Delta > T_1$ и T' подбираются из условия увеличения запаса устойчивости по фазе φ и по амплитуде h при ограничении на величину частоты среза системы. При правильном выборе параметров они составляют $\varphi = 60...75^\circ$, $h = 16...19$ дБ для номинальной системы.

Синтез внутреннего контура

Основным требованием к внутреннему контуру является свойство устойчивости при наличии неопределенности в передаточной функции $W_{01}(p)$ и воздействия на него со стороны внешнего контура. Рассмотрим вначале действие второго фактора. Эквивалентная структурная схема для синтеза регулятора внутреннего контура представлена на рис. 2, а эквивалентная схема для его расчета – в [1].

Передаточная функция эквивалентного объекта для определения $W_{p1}(p)$ с учетом отрицательности обратной связи будет

$$W_{\mathcal{G}}^0(p) = W_{p2}(p) \cdot W_0^0(p) + W_{01}^0(p), \quad (10)$$

где $W_{p2}(p) = W_B(p) [\Phi_1^0(p)]^{-1}$ в соответствии с (3).

Обозначим $W_{z2}(p) = W_B(p) \cdot W_{02}^0(p)$ – известная желаемая передаточная функция разомкнутой системы

внешнего контура, которая используется для выбора управления (1). Тогда с учетом $W_0^0(p) = W_{01}^0(p) \cdot W_{02}^0(p)$ получим

$$W_{\Sigma}^0(p) = W_{01}^0(p) \{ W_{Z2}(p) \cdot [\Phi_1^0(p)]^{-1} + 1 \}. \quad (11)$$

Из (11) видно, что при синтезе внутреннего регулятора $W_{p1}(p)$ возможны два подхода. Первый состоит в решении задачи робастной стабилизации для объекта с передаточной функцией $W_{01}^0(p)$ и с мультипликативной неопределенностью $W_{01}^0(p) \cdot W_{Z2}(p) \cdot [\Phi_1^0(p)]^{-1}$, так как передаточная функция $\Phi_1^0(p)$ еще не определена. Второй состоит в замене передаточной функции $\Phi_1^0(p)$ на передаточную функцию $\Phi_{Z1}(p)$, определяющую известное желаемое движение внутреннего контура. После этого решается задача робастного синтеза для передаточной функции (11). Неопределенность в этом случае возникает из-за отличия реальной передаточной функции $\Phi_1^0(p)$ от желаемой $\Phi_{Z1}(p)$.

Если передаточная функция $W_{01}(p)$ содержит собственную неопределенность, то в (11) вместо $W_{01}^0(p)$ будет $W_{01}(p)$, что еще больше увеличивает неопределенность в задании $W_{\Sigma}^0(p)$, но не меняет способа решения задачи.

Принципиально для решения сформулированных задач годятся любые методы синтеза робастных систем. Используем методику [5], позволяющую получить структурно устойчивый внутренний контур для минимальных фазовых передаточных функций $W_{01}(p)$ с произвольной относительной степенью, не содержащих запаздывания. Например, для случая, когда относительная степень $W_{01}(p) = 3$, передаточная функция регулятора может быть получена в виде

$$W_{p1}(p) = (\mu + \chi) \cdot \sigma^2 \cdot k_1 \cdot \frac{\beta_2(p)}{p^2 + \sigma \cdot k_2 \cdot p + \sigma^2 \cdot k_1}, \quad (12)$$

где $\beta_2(p)$ – устойчивый полином второго порядка, $\mu \rightarrow \infty$, $\sigma > \mu + \chi$, χ – настраиваемый параметр, k_1, k_2 – обеспечивают устойчивость знаменателя.

Грубость внутреннего контура обеспечивается конечным, но большим коэффициентом передачи μ . Так как порядки полиномов числителя и знаменателя в (12) совпадают, то передаточная функция (11) правильная.

Пример синтеза системы управления трубчатой нагревательной печью

Пусть в качестве управления используется подача топливного газа в горелку, а в качестве промежуточной и основной переменной – температура в конвекционной камере и температура нефтепродукта на выходе печи соответственно. Структурная схема системы управления тепловым режимом печи показана на рис. 3.

В качестве исполнительного механизма используется пневматический привод с передаточной функцией $W_{ИМ}(p)$ первого порядка с постоянной времени, равной 25 с. Измерения обеих температур осуществляется терморпарами с одинаковыми постоянными времени, равными 30 с, которые имеют передаточные функции $W_{ТП}(p)$ первого порядка. Собственная дина-

мика связи управления и промежуточной переменной имеет постоянную времени, равную 10 с. В результате для первого контура получим передаточную функцию с относительной степенью, равной трем

$$\bar{W}_{01}^0(p) = \frac{0,8}{(25p + 1) \cdot (30p + 1) \cdot (10p + 1)}.$$

Передаточная функция регулятора внутреннего контура была получена по формуле (12) при $\sigma = 200$, $k_1 = k_2 = 1$, $\mu + \chi = 70$, $\beta_2(p) = (50p + 1)^2$. Она имеет вид

$$W_{p1}(p) = 28 \cdot 10^5 \cdot \frac{2500p^2 + 100p + 1}{p^2 + 200p + 4 \cdot 10^4}. \quad (13)$$

Передаточная функция объекта $W_{002}(p)$ имеет вид

$$W_{02}^0(p) = \frac{0,6 \cdot \exp(-8p)}{(12p + 1) \cdot (18p + 1)} \approx \frac{0,6 \cdot \exp(-15p)}{32p + 1}.$$

Аппроксимация проводилась для $W_{02}^0(p)$ по переходной характеристике.

Так как структура внешнего контура на рис. 3 отличается от структуры на рис. 1, то вместо ПИ закона регулирования (9) используется ПИД закон, который рассчитывается по аналогии с (9) для рис. 3 методом компенсации. Пусть желаемое движение разомкнутого внешнего контура с виртуальным регулятором $W_B(p)$ как в [4] описывается звеном $(\omega_c / p) \cdot \exp(-15p)$. Тогда

$$W(p) = W_B(p) \cdot W_{02}^0(p) \cdot W_{ТП}(p) = (\omega_c / p) \cdot \exp(-15p).$$

Отсюда

$$W_B(p) = \frac{(\omega_c / p) \cdot \exp(-15p)}{W_{02}^0(p) \cdot W_{ТП}(p)} = \frac{\omega_c}{0,6} \cdot \frac{(32p + 1) \cdot (30p + 1)}{p \cdot (0,5p + 1)}, \omega_c = \frac{0,343}{15} = 0,023 \text{ с}.$$

Малая постоянная времени, равная $T = 0,5$ с, введена для регуляризации передаточной функции $W_B(p)$. Таким образом, получаем аналог передаточной функции (9). Для увеличения грубости внешнего контура дополним полученную передаточную функцию выражением (8) при $d = 0,8$, $T' = 0,8$ с, $T'' = 6$ с, $T_1 = 20$ с, $T_{\Delta} = 75$ с. Частота среза полученной системы $\omega'_c = 0,02 \text{ с}^{-1} \approx \omega_c$, запас устойчивости по фазе равен 82° , запас устойчивости по амплитуде – 17,1 дБ, время регулирования – 122с, перерегулирование – 9%. Система не теряет устойчивости при изменении коэффициента передачи $W_{02}^0(p)$ относительно номинального значения $k_{02}^0(p) = 0,6$ в пределах $0 < k_{02}/k_{02}^0 \leq 7$. При изменении $0 < k_{02}/k_{02}^0 \leq 5$ перерегулирование не превышает 23,3%, а время регулирования 126 с. При переходе от аппроксимированного выражения $W_{02}^0(p)$ к реальному следует уменьшить значение d от 0,8 до 0,4 для обеспечения равенства $\omega'_c \approx \omega_c$.

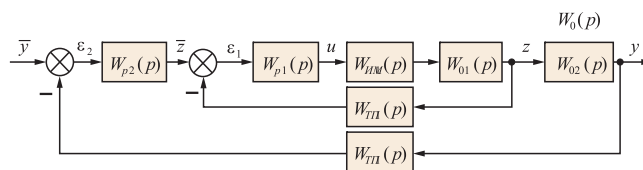


Рис. 3

Для определения передаточной функции регулятора внешнего контура $W_{p2}(p)$ используется формула (3), куда входит компенсатор внутреннего контура $[\Phi_1^0]^{-1}$. Передаточная функция внутреннего контура определяется по формуле

$$\Phi_1^0(p) = \frac{W_{p1}(p) \cdot W_{o1}^0(p) \cdot W_{им}(p)}{1 + W_{p1}(p) \cdot W_{o1}^0(p) \cdot W_{им}(p) \cdot W_{тп}(p)}$$

Она является строго правильной, поэтому при ее обращении требуется регуляризация за счет введения малых постоянных времени. В результате получим передаточную функцию регулятора внешнего контура вида

$$W_{p2}(p) = \frac{0,023}{0,6} \cdot 0,4 \cdot \frac{(32p+1) \cdot (30p+1)}{p \cdot (0,5p+1)} \cdot \frac{6p+1}{0,8p+1} \cdot \frac{20p+1}{75p+1} \cdot [\Phi_1^0(p)]^{-1},$$

$$[\Phi_1^0(p)]^{-1} = \frac{0,0066p^4 + 1,3p^3 + 25p^2 + p + 0,01}{370p^4 + 767p^3 + 55p^2 + 1,3p + 0,01}. \quad (14)$$

Таким образом, получены передаточные функции регуляторов (13), (14) каскадной системы (рис. 3), которая не теряет устойчивости при $0 < k_{02}/k_{02}^0 \leq 36$.

Харазов Виктор Григорьевич – д-р техн. наук, проф., Фокин Александр Леонидович – д-р техн. наук, проф., Джараган Максим Александрович, Сыроквашин Владислав Викторович – аспиранты каф. "Автоматизация процессов химической промышленности" Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

Контактный телефон (812)259-47-53.

Компания ICS Triplex ISaGRAF получила награду Leonard Grand Prize in Innovation на выставке Automation-optimization Europe 2005

ICS Triplex ISaGRAF Inc, ведущий производитель ПО для систем контроля и управления, с гордостью объявляет о получении награды Leonard Grand Prize in Innovation за свой новый программный продукт ISaGRAF 5.0. Награда в категории "Программные решения" была вручена представителю компании ICS Triplex ISaGRAF на выставке Automation-optimization Europe 2005 в г. Париже.

Благодаря новым свойствам и совместимости со стандартами IEC 61131 и IEC 61499 ISaGRAF 5.0 повышает планку для новых программных продуктов, которые используются в системах автоматизации. IEC 61499 – это

При $0 < k_{02}/k_{02}^0 \leq 3$ перерегулирование не превышает 23%, а время регулирования 210 с. Передаточную функцию (14) можно упростить, если в качестве компенсатора внутреннего контура использовать приближенное выражение $(T_p+1)/(T_\varepsilon p+1)$ при $5с \leq T \leq 40$ с. При этом несколько снижаются качественные показатели системы. Увеличение T приводит к увеличению перерегулирования и уменьшению времени регулирования.

Список литературы

1. Автоматическое управление в химической промышленности/ Учебник для вузов. Под ред. Е. Г. Дудникова. М.: Химия, 1987.
2. Мирошник И.В. Нелинейные системы. Анализ и управление. – СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2002.
3. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егупова. М.:Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.
4. Афлятунов Р.М., Джараган М.А., Фокин А.Л. Робастное управление линейным инерционным объектом с запаздыванием //Автоматизация и современные технологии. 2004. №10.
5. Бобцов А.А. Алгоритм робастного управления в задаче слежения за эталонным сигналом//Автоматика и телемеханика. 2003. №6.

стандарт, который включает рекомендации по использованию функциональных блоков в распределенных системах контроля, измерения и управления. Использование этих рекомендаций предоставляет преимущества, характеризующиеся возможностью: регулирования потока решений для управления и взаимодействия с распределенной системой управления; обеспечения последовательности данных; обеспечения средств, которые гарантируют синхронное взаимодействие между устройствами; устранения потребности иметь отдельные схемы синхронизации; развития и обслуживания надежных систем контроля и управления.

[Http://www.fiord.com](http://www.fiord.com)

НИТА применяет VxWorks в авиационном бортовом транспондере АЗН-В

Фирма "НИТА" (Новые Информационные Технологии в Авиации) основана в 1990 г. и является одним из наиболее известных российских предприятий, специализирующихся на разработках и серийном производстве авиационного оборудования и ПО. Одним из направлений деятельности НИТА является разработка и производство оборудования АЗН-В (Автоматического Зависимого Наблюдения Вещательного типа).

Наземная базовая станция и бортовой авиационный транспондер АЗН-В были продемонстрированы на авиасалоне "МАКС-2005" в действующем режиме, при котором обеспечивалось наблюдение за реальными полетами воздушных судов, участвующих в летной программе авиасалона. Данное оборудование предлагается для применения

в различных проектах организации мониторинга наземного и авиационного транспорта, в том числе и в программе правительства Москвы по организации авиатакси в Москве и Московской области.

Бортовой авиационный транспондер АЗН-В "Пульсар", разработанный совместно с ГосНИИАС, работает под управлением ОС РВ VxWorks (www.vxworks.ru), а встроенное ПО транспондера разработано с помощью инструментальных средств компании Wind River. НИТА применяет следующие продукты Wind River: ОС VxWorks со средой разработки Tornado; оптимизирующий компилятор Diab; BDM/JTAG-адаптер visionICE с отладчиком visionCLICK; отладочную плату (reference design) на базе микропроцессора PowerPC.

[Http:// www.nita.ru](http://www.nita.ru)

