

УДК 621.039.53

СИНТЕЗ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТОВ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ

Ю.М. КОВРИГО, Т.Г. БАГАН

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, Киев, 03056, Украина*

Поступила в редакцию 29 января 2015

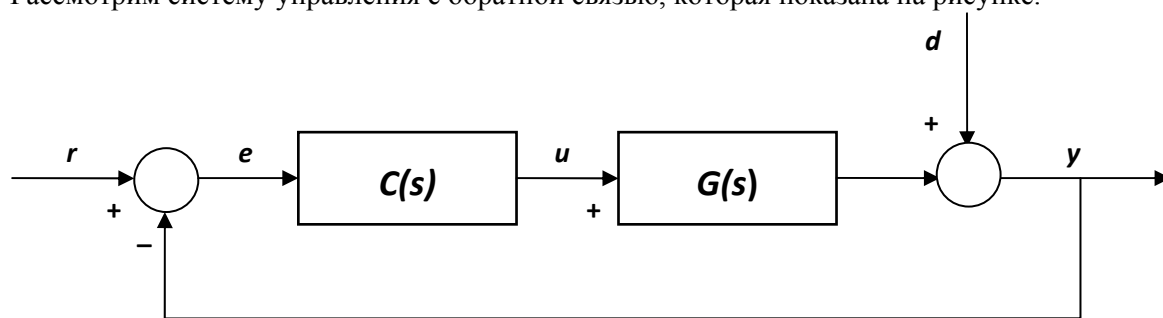
На сегодняшний день одним из ключевых направлений является синтез систем управления в условиях неопределенности. Это связано с различными факторами, такими как неточное задание математической модели объекта, упрощение в описании модели, понижение степени сложности или неучитывание существующих нелинейностей. Неопределенности также могут возникать в результате старения элементов объекта при эксплуатации, при воздействии на объект внешних возмущений. Поэтому возникает необходимость создания таких автоматических систем, которые при переменных параметрах объекта и воздействии внешних возмущений оставались бы не только в устойчивом состоянии, но и обеспечивали необходимое качество функционирования. Исследования и синтез таких систем проводятся в рамках теории адаптивного и робастного управления. Идея робастного проектирования заключается в том, что необходимо подобрать такие настройки управляющих параметров, чтобы влияние неучтенных факторов на выходные характеристики было минимальным.

Реальная работа действующей АСУ не может быть абсолютно точной в силу многих причин: наличие запаздывания в регулирующем канале объекта управления, наличие ограничений на запас устойчивости и робастность замкнутых контуров, ограничения на возможный диапазон изменения регулируемых переменных и др. В процессе работы всегда существует отклонение регулируемой величины от заданного значения. Для оценки этого отклонения вводится понятие качества процесса управления, вызванного типичным возмущением. Обычно типичным возмущением выбирается ступенчатое, а качество переходных процессов определяют прямыми показателями качества: максимальным отклонением регулируемой величины, длительностью переходного процесса и его колебательностью. Чем меньше эти показатели, тем качество управления считается лучшим. При этом количество таких показателей значительно и нет одного-двух, которые реально и постоянно лучше остальных удовлетворяют разработчиков и пользователей систем управления. Наоборот, что хорошо для одних, то менее интересно другим. На практике существуют другие приоритеты лучшей АСУ, а именно: безопасность и надежность, то есть – робастность; экономическая эффективность, удобство применения, понятность; конкретные прямые показатели качества функционирования АСУ.

Для следящих систем, когда входным возмущением является изменение задания регулятору, реакция системы на ступенчатое задающее влияние одновременно является и переходной характеристикой замкнутого контура. И тогда колебательность будет характеризоваться запасом устойчивости системы. Однако качество функционирования АСУ технологическими процессами определяется не только реакциями на изменение задания, но и реакциями на внешние возмущения. Возмущений может быть много, они могут входить в объект с разных сторон и с разной динамикой. Кроме того, среди них могут быть недоступные для измерения возмущения. Таким образом, помимо прямых показателей качества, АСУ должна иметь достаточный запас устойчивости.

Несмотря на современные достижения в теории управления, популярной стратегией управления на практике по-прежнему остается ПИД-регулятор. По оценкам экспертов, его использование в системах управления достигает более 95 % [1]. В последние годы появилось

много работ, посвященных робастному управлению, но почти все они носят чисто теоретический характер и направлены на круг математиков, а не инженеров. Широко распространены эмпирические методы настройки ПИД-регуляторов, однако они несовершенны, поскольку используют частичную информацию и дают ожидаемые результаты лишь при выполнении определенных условий и ограничений. Для проектировщика важно знать, в какой мере в результате синтеза система приближается к оптимальному состоянию, как настроить регулятор для обеспечения количественных показателей качества и запаса устойчивости и как достичь разумного компромисса между этими противоречивыми целями синтеза. Хорошая теория проектирования должна давать инженеру понятную связь между ее положениями и практическими требованиями и ограничениями. Только тогда она будет пригодна для приложений и решения практических задач. То есть результаты должны иметь теоретическую основу, и в то же время, должны быть понятны и приняты практиками. В последнее время было предложено немало способов решения этой проблемы на базе традиционных ПИ-, ПИД-алгоритмов и упредителя Смита. Однако в некоторых из них соотношение времени запаздывания к постоянной времени ограничено, а остальные не имеют достаточной робастности и очень чувствительны к изменениям параметров объекта, особенно запаздывания. Применение традиционных методик для настройки объектов с большим временем запаздывания приводят к плохому качеству или неустойчивости системы. Рассмотрим систему управления с обратной связью, которая показана на рисунке.



Структурная схема системы управления с обратной связью:
 $C(s)$ – регулятор, $G(s)$ – объект с самовыравниванием, r – задание, y – выход системы,
 d – внешнее возмущение, u – выход регулятора, и e – сигнал рассогласования

Согласно параметризации Юллы [2], все устойчивые регуляторы могут быть выражены как

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - G(s)Q(s)}, \quad (1)$$

где $Q(s)$ является устойчивой передаточной функцией.

Таким образом, если определенным образом найти структуру и параметры функции Q , то, используя (1), можно достаточно легко получить структуру и настройки регулятора C . Для решения поставленной задачи рассматривается возможность применения регулятора с использованием в своей структуре модели объекта – ИМС (Internal Model Control – внутренняя модель управления) [2, 3], но с использованием прямых показателей качества функционирования [4 – 6]. Если модель является точной, то передаточная функция от $d(s)$ к $y(s)$, которая представляет собой функцию чувствительности, представляется как

$$S(s) = 1 - G(s)Q(s). \quad (2)$$

Возьмем в качестве критерия оптимальности H^∞ норму (2):

$$\min \|W(s)S(s)\|_\infty, \quad (3)$$

где $W(s)$ – некоторая весовая функция.

Такой выбор основан на том, что эта норма представляет собой верхнюю границу коэффициента усиления системы между 2-нормой входа и 2-нормой выхода. Поэтому H^∞ -норма – это корень квадратный из энергии выхода при действии на вход возмущения с

единичной энергией [3]. Таким образом, минимизация H_∞ -нормы означает минимизацию энергии ошибки для наихудшего варианта входного возмущения.

Предположим, что на вход системы подается скачкообразное возмущение, т.е. $d(s) = 1/s$. Весовая функция в H_∞ оптимальном управлении должна удовлетворять условию: $\|d(s)/W(s)\|_\infty \leq 1$. Тогда весовая функция может быть просто принята как $W(s) = 1/s$.

На практике простота использования является одним из важных требований. Основная идея заключается в синтезе регулятора на основе приближенной модели, а затем использования его для обеспечения нужных показателей качества функционирования реального объекта.

Для синтеза рационально использовать модель соответствующей сложности. В большинстве случаев для описания динамики поведения объектов в энергетике достаточно использовать модель, которая описывается аperiодическим звеном 1-го (4) или 2-го порядка (5) с запаздыванием:

$$G(s) = \frac{K_o \exp(-\tau s)}{(T_o s + 1)} \quad (4)$$

$$G(s) = \frac{K_o \exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (5)$$

где T_o , T_1 и T_2 – постоянные времени, K_o – коэффициент передачи объекта, τ – запаздывание.

Время запаздывания является одним из самых сложных факторов в процессе управления. Это иррациональное термин с математической точки зрения. Тем не менее, оно может быть аппроксимировано рациональной передаточной функцией с использованием разложения Тейлора (6) [5, 6] или Паде (7) [4].

$$e^{-\tau s} \approx 1 - \tau s, \quad (6)$$

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1 - \tau/2 s}{1 + \tau/2 s} \quad (7)$$

Таким образом, с учетом разложения (6) или (7), модель объекта (4) или (5) может быть аппроксимирована и решив (3) относительно Q , предположив, что на систему подано единичное ступенчатое возмущение, можно определить единственное оптимальное решение $Q_{\text{опт}}$. Так как полученная функция представляет собой неправильную дробь, то вводится следующий фильтр:

$$J(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^2}, \quad (8)$$

где λ – некий временной коэффициент.

Вследствии чего получаем правильную $Q(s)$, а используя (1), определим структуру регулятора для (4) – (9) и для (5) – (10).

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - G(s)Q(s)} = \frac{1}{K_o} \frac{(T_o s + 1)(\tau/2 s + 1)}{\lambda^2 s^2 + (2\lambda + \tau/2)s} \quad (9)$$

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - G(s)Q(s)} = \frac{1}{K_o} \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{\lambda^2 s^2 + (2\lambda + \tau)s} \quad (10)$$

После несложных преобразований регуляторы (9, 10) можно привести к структуре ПИД-регулятора, в настройках которого присутствует регулируемый параметр λ , который является степенью качества в H_∞ -ПИД-регуляторе. Этот параметр имеет прямое отношение к номинальному качеству и робастности замкнутой системы. Изменяя этот параметр, можно получать различные количественные показатели качества замкнутой системы и робастности. Обычно λ попадает в интервал $0,2 \tau - 1,2 \tau$.

Номинальное качество и робастность системы конфликтуют друг с другом. Выбрав соответствующую степень качества, можно достичь компромисса между показателями качества системы и ее робастностью. Монотонность изменения степени качества означает, что компромисс в процедуре настройки регулятора можно достичь довольно просто.

Так как приближенная модель не совсем точно описывает оригинальный объект, то существует возможность того, что регулятор стабилизирует приближенную модель, но не сможет стабилизировать реальный объект. Использование степени качества может решить эту проблему. То есть приближенная модель рассматривается как реальный объект, а аппроксимация ошибки считается неопределенностью. Наличие погрешности приближения устанавливает нижний предел устойчивости на степень качества. Пока степень качества больше, чем нижняя граница, замкнутая система устойчива.

Проведенные исследования показали наличие однозначной зависимости настраиваемой степени качества λ от основных показателей качества функционирования системы [4-6]. Получены зависимости, которые позволяют синтезировать H_∞ -ПИД-регулятор под заданные показатели качества. При этом управляемый параметр регулятора только один.

Если же имеем дело с объектом, у которого изменяются параметры, тогда необходим синтез для неопределенной системы. В этом случае, существует дополнительная неопределенность на погрешность приближения. Если совокупность неопределенностей известна, точная степень качества может быть рассчитана с необходимым и достаточным условием для робастной работы.

Процедура настройки может включать следующие этапы:

- 1) Разработка регулятора для номинального объекта с заданным показателем качества.
- 2) Замена номинального объекта на объект в худшем случае (т.е. коэффициент передачи объекта и время запаздывания принимается за их максимальное значение, а постоянная времени – минимальное значение).
- 3) Подбор степени качества по известным зависимостям для обеспечения показателей качества функционирования системы нужного значения.

Использование структуры ИМС с критерием оптимальности в виде H_∞ -нормы позволяет осуществить простую и быструю настройку ПИД-регулятора для объектов 1-го и 2-го порядка с запаздыванием. Эти настройки напрямую зависят от параметров объекта и от выбранной величины λ . Изменяя этот коэффициент, можно гарантированно получить заданный прямой показатель качества, удобный для практики, либо достичь желаемого сочетания нескольких показателей качества, которое выполняется во всем диапазоне работы системы, тем самым обеспечивая ее робастность.

Список литературы

1. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID controller tuning rules. 3rd ed ICP, 2010.
2. Morari. M., Zafiriou E. Robust Process Control. New Jersey, 1989.
3. Astrom K.J., Hagglund T. PID controllers: Theory, design, and tuning. NC, 1995.
4. Ковриго Ю.М., Баган Т.Г. // Наукові вісті НТУУ "КПІ". 2013. № 1.
5. Ковриго Ю.М., Баган Т.Г., Бунке А.С. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2013. Том 3, № 3 (63). С. 58–63.
6. Ковриго Ю.М., Баган Т.Г., Бунке А.С. // Теплоэнергетика. 2014. № 3. С. 9–14.