

УДК 621.391

И. Г. Сухорукова, ассистент (БГТУ); **Д. А. Гринюк**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);
И. О. Оробей, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

МОДИФИКАЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЗАПАСА ПО УСТОЙЧИВОСТИ

Статья посвящена вопросам использования интегральных критериев для поиска настроек пропорционально-интегрально-дифференциальных законов регулирования технологических процессов. Для различного соотношения коэффициентов передаточных функций объектов и времени запаздывания получены настройки регулирования, которые минимизируют модификации интегральных критериев. Для оптимальных настроек найден запас по устойчивости для линейного и нелинейного контура регулирования. Предложены варианты оценки времени переходного процесса с помощью интегральных критериев, которые позволяют оценить время переходного процесса и эффективность их использования при оптимизации настроек регуляторов для линейных и нелинейных объектов регулирования. Критерии настройки регуляторов могут быть использованы для построения адаптивных систем. Исследования проводились в системе MatLab.

The article is devoted to the use of integral criteria for the search of buildings, proportional-integral-differential laws regulating technological processes industrial systems with the help of numerical simulation. Correlation coefficients for the different transfer functions of objects control and time delays were obtained setting regulations that minimise the modification of integral criteria error control. For optimum control settings defined margin of stability for linear and non-linear control loop. Variants of estimating the time of the transition process by means of integral criteria. This allows to estimate the time of the transition process and use it for numerical optimisation, simulation modelling and analysis result. The proposed method and integral criteria of adjustment knobs are used to optimisation linear and non-linear control objects industrial processes integrated adaptation system. The studies were conducted in the MatLab.

Введение. В начале XXI в. в промышленной автоматизации сформировалась устойчивая тенденция перехода от автономных распределенных систем управления к интегрированным системам управления промышленным производством в целом в масштабах предприятия, холдинга или объединения. Современное промышленное производство характеризуется тенденцией к усложнению. Это накладывает определенные требования и на свойства систем управления этим производством. Система управления должна быть быстродействующей, «интеллектуальной», т. е. иметь возможность быстро перестраиваться под новые условия производства, надежной, дешевой, простой в обслуживании и т. д.

Можно привести еще десяток свойств, но даже не это является главным показателем уровня развития современных систем управления. Общество вступило в такую фазу развития, когда «дошли руки» до автоматизации наукоемких видов производств (машиностроение, химическая промышленность, транспорт, энергетика, связь), которые в полной мере ранее не могли быть автоматизированы из-за многомерности и сложности протекающих в них процессов.

Результаты исследования ведущих инженеринговых фирм автоматизации Yokogawa Electric Corporation и Honeywell показывают, что вложения в усовершенствование управления и оптимизация настроек гораздо быстрее обеспечи-

вают возврат инвестиций, чем установка более точного и совершенного оборудования [1].

В большинстве случаев настройку регуляторов производят по линеаризованным моделям для линейных регуляторов или прикладными методами непосредственно в «полевых» условиях. Однако технологические объекты химической промышленности, машиностроения и т. д. очень редко проявляют сугубо линейные свойства даже в диапазоне регулирования. Учет нелинейных свойств или использование нелинейных корректирующих элементов позволяет получить существенное улучшение хода протекания процесса при эксплуатации и настройке. Практически все объекты в процессе эксплуатации меняют свои статические и динамические свойства, и на современных предприятиях производят постоянную идентификацию параметров с целью оптимизации работы объектов.

Постановка проблемы. Даже для наиболее распространенного ПИД-регулятора (пропорционально-интегрально-дифференциального) существуют различные оценки качества настройки. В классической теории управления в основном доминирует обеспечение запаса устойчивости по фазе и по модулю за счет корневых или частотных методов [2–6]. Теоретически эти методы хорошо проработаны, однако результат настройки очень часто не гарантирует приемлемого качества переходного процесса (КПП) и

неприемлем для контуров регулирования с нелинейностью. При одном и том же запасе по устойчивости могут быть различные КПП, поскольку для того же ПИ-регулятора граница неустойчивости имеет характер гиперболы (рис. 1) в координатах коэффициента пропорциональности K_P и времени интегрирования T_I .

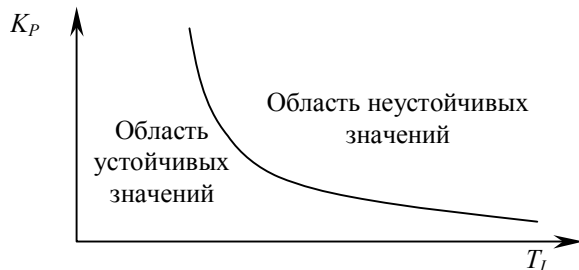


Рис. 1. Разделение на устойчивые и неустойчивые комбинации коэффициентов K_P и T_I

Комбинируя параметры K_P и T_I , можно добиться различных значений качеств переходных процессов: величины перерегулирования, декремента затухания, времени переходного процесса, количества колебаний и других параметров качества, встречающихся в литературе [2, 5, 6]. Для ПИД-регулятора таких комбинаций еще больше. Непосредственное использование перечисленных параметров для поиска настроек затруднено в связи с тем, что улучшение одного из них происходит за счет других. Поиск K_P и T_I можно производить только методом численной оптимизации, поскольку аналитический расчет применим только для очень простых передаточных характеристик объекта.

Перечисленные параметры КПП наиболее понятны для технологов. При управлении технологическими объектами часто требуется различное качество переходного процесса и поиск весовых коэффициентов для формирования критерия численной оптимизации нетривиальных задач. Решением проблемы поиска настроек регуляторов для различных прикладных задач может быть использование интегральных критериев качества переходного процесса и их модификаций. Существует достаточно большое количество алгоритмов и программ, которые могут решать минимаксные задачи с тремя степенями свободы. Поиск настроек можно решать как для линейных, так и для нелинейных контуров регулирования. Как уже отмечалось [7], с помощью различных модификаций можно добиваться различных качеств переходных характеристик с доминированием тех или иных КПП. Исследование предполагает получить более четкое формирование достоинств модификаций интегральных критериев при решении прикладных задач.

Методика исследования. В качестве объекта исследования была выбрана передаточная характеристика вида

$$W_O = \frac{k_O}{T^2 p^2 + 2zTp + 1} \exp(-\tau p), \quad (1)$$

где k_O – коэффициент усиления объекта; T – постоянная времени; p – оператор Лапласа; z – коэффициент колебательности.

Величина T имела фиксированное значение, равное 30 с, коэффициент усиления $k_O = 1$. Параметры z и τ варьировались. Диапазон изменения z от 0,1 до 10 позволял охватывать исследованием чисто апериодические объекты и объекты с резонансными корнями. Запоздывание принимало значения 0, 1, 10, 25 и 40 с.

Для фиксированных значений z и τ проводилась последовательная минимизация интегральных критериев:

$$\int_0^{\infty} t^N |e(t)| dt \rightarrow \min; \quad (2)$$

$$\int_0^{\infty} t^N e^2(t) dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

где e – ошибка выходной переменной. Величина N принимала целые значения от 0 до 4.

Поиск настроек проводился для линейного и нелинейного ПИ-регуляторов. Отличительной особенностью нелинейного регулятора было логарифмирование сигнала ошибки перед подачей его на интегратор. Моделирование производилось с помощью системы MatLab. Кроме открытости алгоритмов численного моделирования, этот пакет характеризуется встроенным ОРС-сервером, который может существенно сократить время внедрения результатов для реальных объектов.

На первом этапе для созданных моделей при постоянных значениях z и τ производился поиск резонансной частоты, при которой в системе с П-регулятором наблюдаются автоколебания. Через найденный коэффициент усиления регулятора и период автоколебаний определялась область поиска оптимальных значений настроек K_P и T_I ПИ-регулятора через пересчетные коэффициенты модифицированного метода Циклера – Никольсона. На следующем этапе осуществлялся поиск значений настроек регулирования, при котором наблюдается минимум параметров, указанных критерием, при различных значениях N . Найденные оптимальные значения K_P и T_I проверялись на глобальный минимум. Для оптимального переходного процесса определялись сопутствующие качества переходного процесса: перерегулирование, время переходного процесса по 3%-ному и 5%-ному

каналу. Кроме классического временного параметра качества переходного процесса $t_{P5\%}$ и $t_{P3\%}$ рассчитывался и модифицированный временной параметр, суть которого демонстрирует рис. 2 и формулы (4) и (5):

$$IT_{3\%} = \frac{\int_0^{t_{1,3\%}} |e(t)| dt}{\int_0^{\infty} |e(t)| dt}; \quad (4)$$

$$IT_{5\%} = \frac{\int_0^{t_{1,5\%}} |e(t)| dt}{\int_0^{\infty} |e(t)| dt}. \quad (5)$$

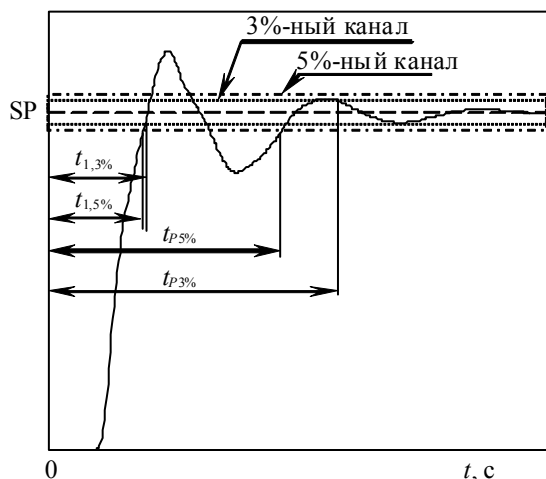


Рис. 2. Определение классического и модифицированного параметра времени переходного процесса. SP – сигнал задания

Классическое определение времени переходного процесса достаточно информативно и интуитивно понятно, однако применение его для оптимизации и суждения о временных параметрах при использовании численных методов затруднено ввиду наличия точек разрыва. Небольшое изменение настройки регулятора приводит к скачкообразному изменению показателя t_p . Из рис. 2 видно, что разность времен $t_{P3\%}$ и $t_{P5\%}$ существенна, однако достаточно немного уменьшить k_p , и эти отличия будут не столь разительны. Наличие таких разрывов существенно усложняет алгоритмы минимизации с помощью численных методов.

С целью оценки временных характеристик для численных методов предложены формулы (4) и (5), а также осуществлена проверка корреляции IT с t_p .

Запас по устойчивости для найденных оптимальных настроек регуляторов определялся пу-

тем нахождения отношения между значением коэффициента $k_{O.A}$, при котором будут наблюдаться автоколебания, и первоначальным k_O .

Результаты и их обсуждение. Введение в интегральный критерий времени в выбранной области изменения времени запаздывания и коэффициента колебательности однозначно увеличивает запас по устойчивости как для линейной системы, так и для системы с нелинейным регулятором (рис. 3, 4). При этом чем больше степень времени, тем выше запас по устойчивости.

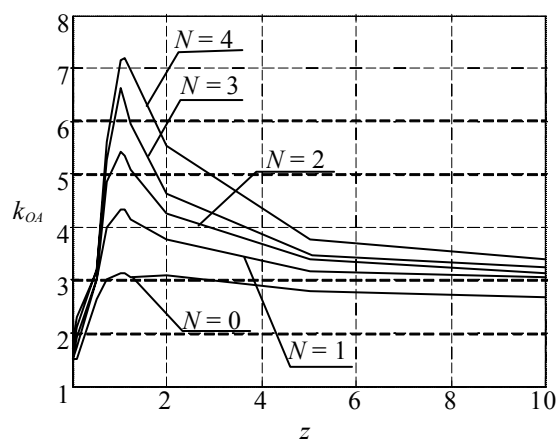


Рис. 3. Изменение запаса по устойчивости для системы с линейным регулятором при $\tau = 10$ при минимизации по (2)

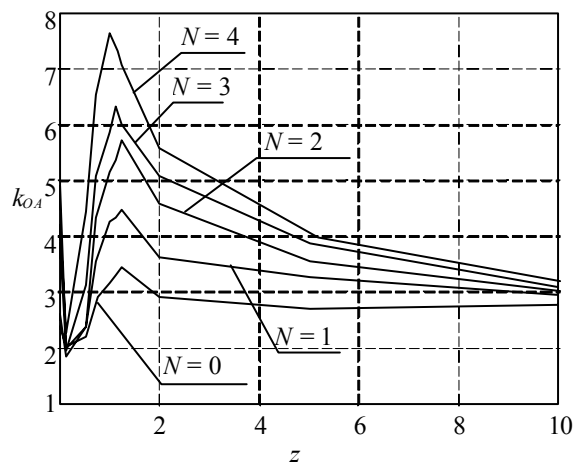


Рис. 4. Изменение запаса по устойчивости для системы с нелинейным регулятором при $\tau = 10$ при минимизации по (2)

В зависимости от динамических свойств объекта управления характер зависимости запаса по устойчивости меняется. При нулевых и малых значениях запаздывания запас по устойчивости не достигает значений больших, чем 5. Результаты минимизации квадратичного критерия (3) приводят к значению параметров настроек регулятора, которые имеют меньший

запас по устойчивости. Снижение запаса по устойчивости на краях на рис. 3, 4 связано с приближением передаточной функции фактически к апериодическому звену. В этом случае минимизация критериев приводит к большим нереализуемым на практике значениям k_p и T_I . Поэтому при настройке стоит вводить ограничение на величину, в первую очередь, k_p , или модифицировать критерии к виду

$$\int_0^{\infty} t^N (|e(t)| + |\mu(t)|) dt \rightarrow \min, \quad (6)$$

где μ – ошибка между стационарным и текущим значением выхода регулятора.

Особенно это надо учитывать, если объект описывается апериодическим звеном первого порядка. В случае наличия транспортного запаздывания и апериодического звена второго порядка и выше введение таких ограничений необязательно, если это не отражает реальные характеристики объекта управления и исполнительных устройств.

При использовании предложенной настройки регуляторов следует уделять должное внимание выбору численных методов решения дифференциальных уравнений. Методы могут иметь накапливаемую статическую погрешность. Кроме этого, следует должным образом относиться к выбору длительности моделирования. При проведении данных исследований выбор диапазона моделирования и метода осуществлялся путем сравнения получаемых значений численного моделирования и результатов аналитического решения при времени запаздывания, равном 0.

Оценка качества переходных процессов с помощью интегральных критериев и моментов [5] предлагалась сравнительно давно, в то же время для настройки ПИД-регуляторов авторы современных учебников [4, 8] по теории автоматического управления предлагают частотные или корневые методы.

Заключение. Введение времени в интегральные критерии с целью повышения запаса по устойчивости для линейной и нелинейной системы показало свою эффективность при поиске настроек регуляторов.

Предложенная методика настройки системы с помощью имитационного моделирования позволяет не ограничивать себя линейными системами и максимально учитывать существующие технологические особенности и технические ограничения. Ее можно использовать и для настройки других современных алгоритмов [9]

реализации отрицательной обратной связи по каналу возмущения или отклонения.

Применение интегрального критерия легко реализуется для настройки в автоматическом режиме с целью адаптации регулирования при меняющихся условиях в современных SCADA и ERP. MatLab, начиная с версии 7.0, имеет встроенный OPC-сервер, кроме того, выпускаются контроллеры с поддержкой MatLab, что позволяет непосредственно для настройки использовать алгоритм, который применялся в исследованиях.

Модификации оценки времени переходного процесса позволяют избавиться от недостатков классического подхода и использовать его для настройки регуляторов путем имитационного моделирования.

Литература

1. Федоров, Ю. Н. Справочник инженера по АСУТП. Проектирование и разработка / Ю. Н. Федоров. – М.: Инфра-Инженерия, 2008. – 928 с.
2. Макаров, И. М. Линейные автоматические системы / И. М. Макаров, Б. М. Менский. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.
3. Попов, Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления / Е. П. Попов. – М.: Наука, 1989. – 304 с.
4. Никулин, Е. А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем: учеб. пособие / Е. А. Никулин. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 230 с.
5. Воронов, А. А. Основы теории автоматического управления. В 3 ч. Ч. 1 / А. А. Воронов. – М.: Энергия, 1965. – 396 с.
6. Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления / под ред. Е. А. Санковского. – Минск: Выш. шк., 1973. – 584 с.
7. Гринюк, Д. А. Оптимизация каскадной системы регулирования для распределенных объектов на основе интегральных критериев / Д. А. Гринюк, И. О. Оробей, И. Г. Сухорукова // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. – 2007. – Вып. XV. – С. 97–100.
8. Управление техническими системами в условиях информационной неопределенности / под ред. В. В. Солдатова. – М.: ООО «УМЦ», 2010. – 308 с.
9. Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 610 с.

Поступила 03.03.2012