

УДК 681.5.013

Д.А. Гринюк, доц., канд. техн. наук; И.Г. Сухорукова, ст. преп.;  
А.С. Михновец, студе.; К.Д. Гедерт, студ. (БГТУ, г. Минск)

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАКОПЛЕННОГО ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ

Существует множество подходов к настройке регуляторов, но интегральные критерии характеризуются обеспечением одновременного компромисса между отдельными параметрами эффективности работы систем автоматического управления. Кроме этого, они обладают универсальностью – с их помощью можно производить настройку как линейных [1-2], так и нелинейных систем [3]. Интегральный критерий – это мера эффективности, основанная на интеграле некоторой функции ошибки управления и, возможно, других переменных, например, времени. Общее выражение

$$Integral\ criterion = \int_0^{\infty} f(x, t) dt .$$

В качестве  $x$  может выступать один параметр системы или несколько,  $t$  – время с начала внешнего воздействия на систему – обычно изменение  $SP$  (рис.), но может быть и сигнал возмущения  $F$ . Можно использовать сигнал с измерительного преобразователя  $x'$ , но лучше ориентироваться на непосредственно физический параметр  $x$ , которым управляет система регулирования. Иногда полезно использовать комбинацию выходного параметра и значение управляющего воздействия  $u$  с регулятора.

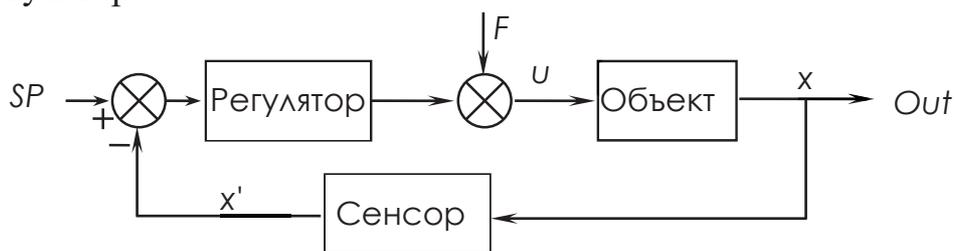


Рисунок – Структурная системы с обратной связью.  $SP$  – сигнал задания;  
 $x$  – выход;  $u$  – выход с регулятора на исполнительный механизм;  
 $x'$  – значение с измерительного преобразователя

Такой подход позволяет обеспечить более комфортную работу исполнительного механизма. Особенно это важно для случаев, когда регулирующий орган меняет свое положение с помощью электродвигателя. Это может позволить существенно снизить количество циклов включения электродвигателя.

В литературе можно встретить различные вариации интегральных критериев, но чаще всего встречаются следующие:

– интеграл абсолютной ошибки (*IAE*):

$$IAE = I_1 = \int_0^{\infty} |x| dt ; \quad (1)$$

– интеграл квадратичной ошибки (*ISE*):

$$ISE = I_2 = \int_0^{\infty} x^2 dt ; \quad (2)$$

– интеграл времени и абсолютной ошибки (*ITAE*):

$$ITAE = I_3 = \int_0^{\infty} |x| t dt . \quad (3)$$

Минимизация каждого из выше указанных критериев, так как и другие модификации интегральных критериев [2], приводят к разным настройкам ПИД-регулятора. Такие параметры качества настройки, как время переходного процесса, перерегулирование, различные варианты оценки запаса по устойчивости приобретают свои значения для каждого из критериев.

Обычно считается, что если система обладает большим диапазоном регулирования, то настройки по критерию *ISE* приводят к максимально быстрому регулированию, однако это достигается за счет большего перерегулирования и снижения запаса по устойчивости. Минимизация критерия *IAE* дает менее агрессивные настройки, но колебательность и перерегулирование также присутствует. Минимизация интегрального критерия *ITAE* приводит к улучшению таких показателей как перерегулирование и запаса по устойчивости. Инженеры-технологи обычно предпочитают такой тип поведения и выбирают данный критерий для настройки. Вышеуказанные результаты не всегда являются обязательными. На наличие или отсутствие большой колебательности сильное влияние оказывают динамические и нелинейные свойства объекта управления. К примеру, наличие в объекте запаздывания оказывает положительное влияние на качество настройки систем автоматического управления.

Еще одним старым критерием, который рекомендуется использовать для поиска настроек регулятора, является интегральный критерий, который позволяет минимизировать сумму квадратичных отклонений выходного параметра  $u(t)$  регулятора и выходного параметра системы  $x(t)$ .

$$I_4 = \int_0^{\infty} (x(t)^2 + u(t)^2) dt . \quad (4)$$

Как вариант, для обеспечения комфортной работы исполнительного механизма можно использовать интегральный критерий абсолютной ошибки

$$I_5 = \int_0^{\infty} (|x(t)| + |u(t)|) dt . \quad (5)$$

Еще одной возможностью обеспечения баланса между показателями качества настройки является вариация степени времени  $N$  в интегральных критериях.

$$I_6 = \int_0^{\infty} |x|t^N dt \text{ или } I_7 = \int_0^{\infty} x^2 t^N dt . \quad (6)$$

При увеличении значения  $N$  обычно происходит уменьшение перерегулирования и увеличение запаса по устойчивости, однако время переходного процесса немного увеличивается. Недостатком данного способа настройки является необходимость вычислительной техники с соответствующим программным обеспечением (ПО), лучше всего Matlab. Можно реализовать или свой поисковый алгоритм или воспользоваться встроенными решениями. За последнее время разработано множество поисковых алгоритмов на основе нейронных сетей, которые позволяют быстро минимизировать выбранный интегральный критерий. В случае применения интегральных критериев для реальных технологических объектов, обеспечение высокой точности обнаружения минимума не требуется, так как большинство объектов имеют вариацию своих динамических свойств. Обычно 50-200 итераций достаточно для получения требуемого качества.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hryniuk D., Suhorukova I., Oliferovich N., Orobei I. Complex tuning of the PID controller according to integral criteria // 2018 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences. P. 1-4.
2. Гринюк Д.А., Оробей И.О., Сухорукова И.Г. Оптимизация каскадной системы регулирования для распределенных объектов на основе интегральных критериев // Труды БГТУ. 2007. С.97-100.
3. Использование нелинейных регуляторов в каскадных системах регулирования при одновременной настройке четырех параметров / Гринюк Д.А. и др.// Труды БГТУ. 2020. - № 2 (236). - С. 61-68.
4. Гринюк Д. А., Оробей И. О., Сухорукова И. Г. Модификация интегральных критериев для повышения запаса по устойчивости // Труды БГТУ. 2012. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 118–121.