

УДК 681.515

Д. А. Гринюк, доц., канд. техн. наук; И. Г. Сухорукова, ст. преп.,  
И. О. Оробей, доц., канд. техн. наук; П. Л. Липский, студ.  
(БГТУ, г. Минск)

## **НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ В КАСКАДНЫХ СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

При синтезе современных высококачественных систем автоматического управления широко используются различные типы линейных устройств регулирования – от наиболее простых универсальных пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) алгоритмов до модального управления, аналитического конструирования регуляторов и др. До недавнего времени нелинейные свойства системы рассматривались как нежелательные элементы, которые усложняют ее поведение и анализ. При наличии нелинейных свойств в объектах управления, которые не легко можно заменить на линеаризованные варианты, разработчикам систем управления приходится для каждого вида нелинейных систем разрабатывать особые подходы к синтезу систем управления. Тем не менее, исследования показали, что во многих случаях использование нелинейных законов управления может значительно улучшить параметры проектируемой системы [1–2]. Отдельно стоит упомянуть об удачных попытках использования при управлении технологическими процессами нечетких, нейронных и гибридных алгоритмов, которые, по сути, также являются нелинейными системами.

Анализ публикации в области нелинейных систем с использованием ПИД-регуляторов позволяет разделить на ряд отдельных направлений.

Обширный класс публикаций посвящен проблемам построения адаптивных схем поиска настроек ПИД регуляторов для управления промышленных объектов. Сюда можно отнести и ранее упомянутые нечеткие, нейронные и гибридные алгоритмы, которые в последнее время получили развитие в различных направлениях теории управления.

Одним из старых направлений исследования нелинейных систем является использование систем управления с переменной структурой. Имеется ряд публикаций как общего характера, так и применимых для ПИД-закона управления. Очень широкое распространение получили нелинейные компенсаторы для замкнутых контуров управления.

Отдельно стоит ряд публикаций по использованию нелинейных функций для устранения недостатков, которые присущи непосред-

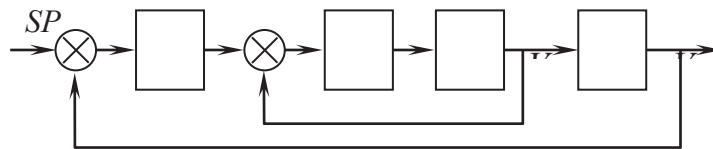
ственно ПИД-закону регулирования [1]. Авторы пытаются за счет подпора нелинейных функций ошибки или управляющего воздействия решить проблему улучшения качества переходного процесса, устранить интегральное насыщение, повысить запас устойчивости и т.д.

Поведение нелинейных систем сложно прогнозируется, особенно если в контуре наблюдается несколько нелинейностей. В [2] была показана эффективность использования функции

$$\mu = \text{sign}(e) \ln((1 + \alpha |e|) - (1 + \alpha)). \quad (1)$$

Она нашла удачное применение и для ПИД-регуляторов с двумя степенями свободы 2DoF [3-4].

Однако ПИД регуляторы используются и в более сложных системах регулирования. К таким можно отнести каскадные системы регулирования (в автоматизированном электроприводе их называют подчиненные). В самой простейшей каскадной системе регулирования используют два регулятора. Внешний регулятор предназначен для обеспечения качества и устойчивости системы регулирования, внутренний для обеспечения быстродействия. В качестве внешнего регулятора обычно используют ПИ- или ПИД-регуляторы, внутренний обычно П- иногда ПД- регулятор [5].



$SP$  – сигнал задания;  $e$  – сигнал ошибки;  $PV_1$  – вспомогательный сигнал  $PV_1$  – выходная переменная;  $W_{R1}$ ,  $W_{R2}$  – передаточные функции внутреннего (вспомогательного) и внешнего (основного) регулятора соответственно;  $W_{O1}$ ,  $W_{O2}$  – передаточные функции внутреннего и внешнего объекта соответственно

**Рисунок 1 - Структура каскадной системы автоматического регулирования (САР).**

Задача стояла проанализировать насколько использование нелинейных регуляторов целесообразно использовать для каскадных систем регулирования.

Наибольшее влияние на настройки регуляторов оказывает наличие транспортного запаздывания в свойствах объекта управления. По этой причине исследование проводилось для объектов с разной величиной запаздывания во внутреннем контуре.

В качестве критерия сравнения был выбран интегральный критерий

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

хорошо зарекомендовавший в ряде предыдущих работ [1, 3, 5].

Большую трудность вызывает степень свободы настраиваемой системы. Поиск оптимальных настроек производился путем последовательной оптимизации то одного, то другого регулятора. Оптимизация настроек производилась путем численного моделирования в MatLab.

Результаты моделирования показали, что нелинейный ПИД-регулятор следует применять осторожно. Улучшение качества переходного процесса при отработке сигнала задания наблюдается только при использовании нелинейного ПИД-регулятора для внешнего контура. Использование статических нелинейных функций для внутреннего регулятора приводили к ухудшению качества системы.

Результаты использования нелинейного внешнего ПИД-регулятора с внутренним П-регулятором, при качественной настройке дают соизмеримый результат с использованием классического ПИД-регулятора с внутренним ПД-регулятором.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сухорукова, И. Г. Применение в ПИД-законе регулирования нелинейных функций преобразования ошибки / И. Г. Сухорукова, Д. А. Гринюк, И. О. Оробей // Труды БГТУ. - Минск : БГТУ, 2013. - № 6 (162). - С. 95-98.

2. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting // 2017 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 2017, pp. 1-4.

3. Hryniuk D. Complex tuning of the PID controller according to integral criteria. / D. Hryniuk, [at al.] 2018 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream), Vilnius, 2018, pp. 1-4.

4. Анализ эффективности ПИД-регуляторов с двумя степенями свободы с помощью интегральных критериев / Д. А. Гринюк [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. - Минск : БГТУ, 2018. - № 2 (212). - С. 82-88.

5. Гринюк Д.А. Оптимизация каскадной системы регулирования для распределенный объектов на основе интегральных критериев. / Д.А. Гринюк И.О. Оробей, И.Г. Сухорукова // Труды БГТУ. Сер. VI. Физ.-мат. науки и информ. — 2007. — Вып. XV. — С.97-100 .