

УДК 621.391

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

ПРИМЕНЕНИЕ В ПИД-ЗАКОНЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОШИБКИ

Статья посвящена вопросам улучшения качества работы пропорционально-интегрально-дифференциальных и пропорционально-интегральных законов регулирования технологических процессов. Рассмотрена возможность улучшения качества работы классического закона регулирования за счет использования нелинейной функции преобразования ошибки. На предварительном этапе исследования были выделены две нелинейные зависимости, которые могут быть легко реализованы существующими средствами регулирования технологических процессов на производстве. Настройка регуляторов производилась с помощью имитационного моделирования в системе MatLab и минимизации модифицированного интегрального критерия. Работа регуляторов проверялась для широкого класса объектов. Для оптимальных настроек линейного и нелинейных законов регулирования определены основные показатели качества переходного процесса.

Article is devoted to questions improving quality work regulators with proportional-integral-differential and proportional-integral laws control technological processes. Quality the classical law of regulation want to improve of use non-linear control loop for the difference between the set point and the actual value. At a preliminary investigation phase two non-linear function (polygonal and logarithmic) which can be easily implemented by existing means of regulation of technological processes on production were selected. Setting regulators was made by means of simulation modelling system and numerical minimisation of the modified integral criterion. The studies were conducted in the MatLab. Operation of regulators was checked for a wide class of objects. For optimal adjustments of the linear and non-linear laws of regulation the main figures of merit of transient phenomenon (time transient, overshoot, robustness) are defined.

Введение. 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.

До недавнего времени нелинейные свойства системы рассматривались как нежелательные элементы, которые усложняют ее поведение. 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.

Использование нелинейных преобразований при формировании управляющих воздействий затрудняется сложностью математических доказательства устойчивости и робастности. Для практического использования новых решений по управлению очень важным является наличие несложных методик настройки работы системы.

Опыт моделирования и практического применения нелинейных корректирующих устройств показал их высокую эффективность.

Важным преимуществом нелинейного устройства коррекции является то, что они удачно сочетаются с линейными алгоритмами [3].

Основная часть. ПИД-алгоритм является одним из наиболее универсальных алгоритмов поддержания технологических параметров. Но в тоже время существуют объекты управления и обстоятельства, когда он проявляет не лучшие качества. В первую очередь это объекты с ограничением на управляющее воздействие и объекты с большим временем запаздывания.

На практике для улучшения качества управления при ограничении на управляющее воздействие чаще всего используются алгоритмические подходы [1–2, 4], например, при попадании системы в ограничение на время его действия отключается интегральная составляющая. Это обеспечивает улучшение качества переходного процесса, но оно уступает качеству переходного процесса при работе регулятора на линейную систему. Работу контура регулирования можно сделать качественнее, если настраивать систему с учетом существующих ограничений, а еще лучше менять настройки в зависимости от прогноза попадания системы в ограничение.

Наиболее резкие изменения сигнала ошибки в контуре регулирования чаще всего связаны с изменениями сигнала задания. Поэтому для улучшения качества переходного процесса можно вводить дополнительные динамические

звенья, которые формируют дополнительные воздействия на исполнительный механизм, минуя регулятор, только при изменении сигнала задания [2]. Однако это снижает вероятность возникновения интегрального насыщения только от сигнала задания.

Для работы с объектами с большим запаздыванием обычно предлагается использовать упредитель (предиктор) Смита. Однако это структурное решение хорошо работает только для объектов с чистым постоянным транспортным запаздыванием. Если запаздывание формируется за счет распределенности инерционного параметра, то применение упредителя Смита может привести к неустойчивости всей системы.

Одним из вариантов улучшения качества регулирования может быть использование нелинейного преобразования ошибки [5].

Методика исследования. Выбор нелинейных функций, которые можно использовать для улучшения ПИД-регулятора, достаточно большой. Однозначно для каждого объекта можно подобрать наилучшую функцию с точки зрения определенных качеств, но процесс оптимизации может потребовать слишком больших затрат и времени. Кроме того, следует учитывать, что при управлении технологическими процессами трудно встретить объект с неизменными в процессе эксплуатации параметрами.

Предпринималась попытка использовать нелинейные функции преобразования ошибки e согласно структуре на рис. 1, которые характеризуются симметричностью относительно начала координат и конечным значением тангенса угла наклона в начале координат [4]. Наиболее универсальными в широком диапазоне параметров моделей оказались логарифмическая функция в блоке F_2 и алгоритм с переключением. Они обеспечивают и приемлемое качество переходного процесса.

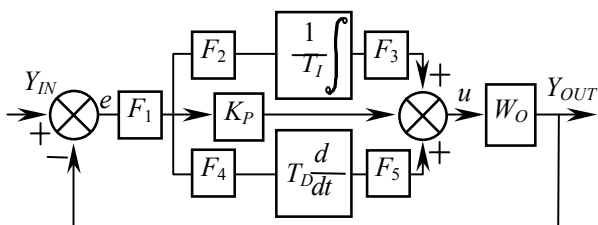


Рис. 1. Структурная схема управления: Y_{IN} – сигнал задания; Y_{OUT} – выход; e – сигнал рассогласования; u – управляющее воздействие; F – нелинейные функции; K_P – коэффициент усиления; T_I – время интегрирования; T_D – время дифференцирования; W_O – передаточная функция объекта

Максимального эффекта можно добиться оптимизацией членов ряда

$$e' = k_1 e + k_2 e^2 + k_3 e^3 + k_4 e^4 + \dots \quad (1)$$

Однако такой подход требует высоких вычислительных ресурсов на оптимизацию и интересен только с теоретической точки зрения. Оптимизация только четырех первых коэффициентов при различных параметрах объекта путем минимизации интегрального критерия приводила к зависимостям, которые обладали плохой робастностью при небольших вариациях параметров объекта. При наложении требования на выбор коэффициентов k_1-k_4 , заключающегося в том, чтобы вторая производная равнялась нулю только в точке $e = 0$, а первая производная имела конечное значение, чаще всего получались кривые, близкие к логарифмической или экспоненциальному виду, в зависимости от места применения нелинейного преобразования.

Произведенные предварительные поиски, а также ориентация на прикладное применение результатов, позволили ограничиться исследованием кусочно-линейной (рис. 2) и логарифмической (рис. 3) характеристик [5]:

$$\mu = \text{sign}(e) \ln((1 + \alpha|e|) - (1 + \alpha)), \quad (2)$$

где α – коэффициент кривизны.

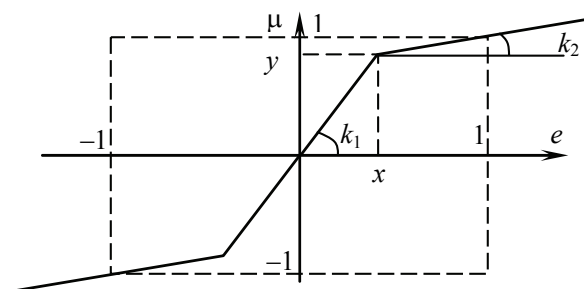


Рис. 2. Кусочно-линейная характеристика. x, y – коэффициенты вариации характеристики

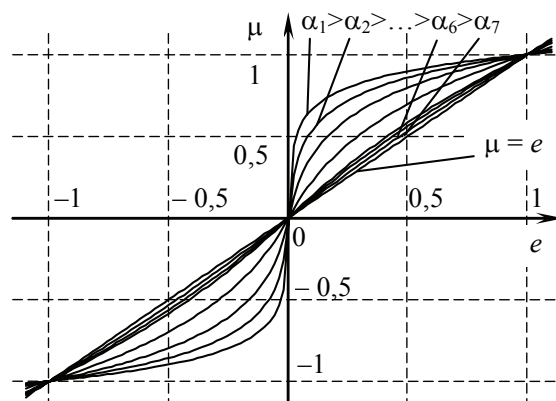


Рис. 3. Нелинейная статическая характеристики при вариации $\alpha = [1000, 125, 25, 5, 1, 0,85, 0,0211]$

Характеристика (2) обладает симметричностью относительно начала координат, а также

приведенными свойствами по производным, которые налагались на выбор коэффициентов при оптимизации коэффициентов ряда (1).

Первично кусочно-линейная характеристика (КЛХ) проверялась при независимом изменении x и y с грубой дискретизацией (13 точек на диапазон для x и y от 0,001 до 0,999). На втором этапе осуществлялся поиск при трех фиксированных значениях x и варьировании величины соотношения между k_1 и k_2 (рис. 3).

Для нелинейной логарифмической характеристики оптимизировался коэффициент α .

В качестве объекта исследования была выбрана передаточная характеристика вида

$$W_o = \frac{k_o}{T^2 p^2 + 2zTp + 1} \exp(-\tau p), \quad (3)$$

где k_o – коэффициент усиления объекта; T – постоянная времени; p – оператор Лапласа; z – коэффициент колебательности; τ – величина запаздывания, которая позволяет охватить широкий класс объектов управления технологических процессов.

Величина T имела фиксированное значение, равное 30 с, коэффициент усиления $k_o = 1$. Параметры z и τ варьировались. Объект управления проверялся при следующих параметрах коэффициента колебательности и величины запаздывания передаточной функции объекта:

$$z = [0,1 \ 0,5 \ 0,9 \ 1 \ 1,2 \ 1,8 \ 5];$$

$$\tau = [0,1 \ 0,5 \ 1 \ 5 \ 15 \ 25 \ 40].$$

Из многообразия возможных критериев [6] был использован модифицированный интегральный критерий (МИК)

$$\int_0^{\infty} t^2 |e(t)| dt \rightarrow \min. \quad (4)$$

Критерий (4) позволяет получить хороший запас по устойчивости и соблюсти баланс по основным качествам переходного процесса [6]. Для оптимальных характеристик определялись величина перерегулирования, время переходного процесса по 5%, 3% и 1%. Робастность настроек проверялась путем изменения коэффициента усиления объекта на 10% в сторону увеличения и уменьшения. Поиск оптимальных настроек для линейного и нелинейного ПИД- и ПИ-регуляторов проводился путем имитационного моделирования в системе MatLab. Найденные параметры системы вторично проверялись на предмет исключения возможности попадания в локальные минимумы.

Результаты и их обсуждение. Использование нелинейных характеристик для ПИД- и ПИ-регуляторов при некоторых значениях τ и z объекта обеспечивает улучшение интегрального критерия больше чем в 2 раза. Одновременно происходило и улучшение других параметров переходного процесса. На рис. 4–8 представлены только некоторые результаты для одного и того же объекта. В целом кусочно-линейная и логарифмическая характеристики показывают сравнимые улучшения.

Характеристику (1) можно использовать только для интегральной составляющей регулятора. Попытки применить ее для всех составляющих ПИД-регулятора приводили в целом к ухудшению характеристик системы. Это подтверждают графики отношения в процентах МИК для нелинейной системы к МИК линейной (ОМИКЛН) для рис. 4–7 и проверка с помощью моделирования.

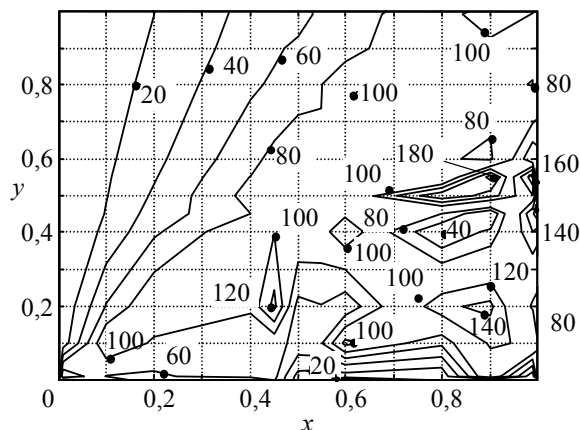


Рис. 4. ОМИКЛН для объекта с $\tau = 15$ с и $z = 1,2$ при различных значениях x и y при прохождении e через нелинейное звено для всех составляющих ПИД-регулятора

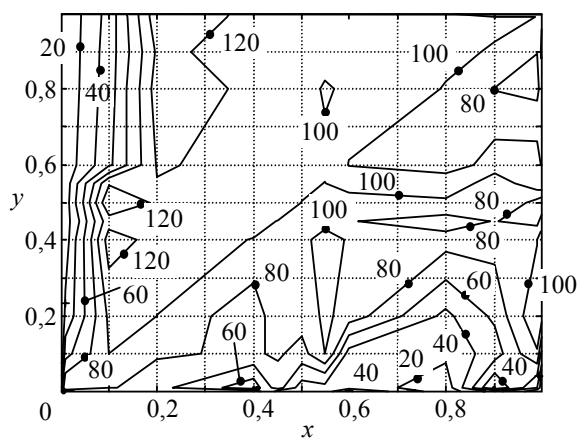


Рис. 5. ОМИКЛН для объекта с $\tau = 15$ с и $z = 1,2$ при различных значениях x и y при прохождении e через нелинейный интегратор ПИД-регулятора

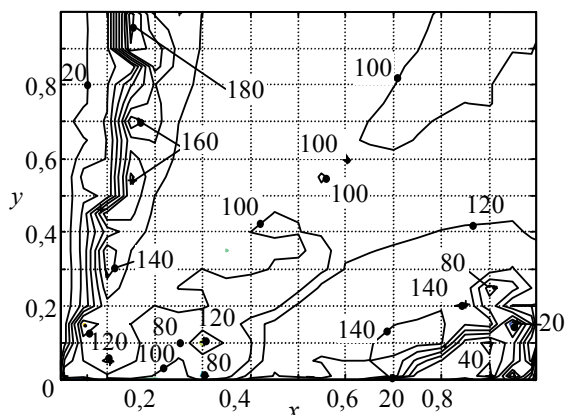


Рис. 6. ОМИКЛН для объекта с $\tau = 15$ с и $z = 1,2$ при различных значениях x и y при прохождении e через нелинейный интегратор ПИ-регулятора

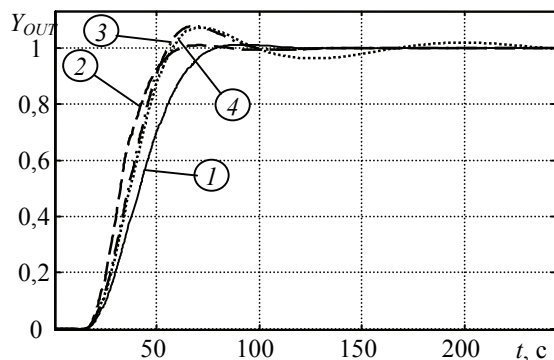


Рис. 7. Переходная характеристика для объекта с $\tau = 15$ сек и $z = 1,2$ при оптимальных настройках для ПИД-регулятора: 1 – линейный регулятор; 2 – e пропускался через КЛХ для всех составляющих регулятора; 3 – e пропускался через характеристику (1) только для интегральной составляющей регулятора; 4 – e пропускался через КЛХ только для T_I

Минимальное значение для интегрального критерия при пропуске сигнала рассогласования через характеристику, представленную на рис. 3, наблюдается при отношении $k_1/k_2 < 1$, а при использовании ее только для интегральной характеристики $k_1/k_2 > 1$. Сравнимого с кусочно-линейной характеристикой результата по улучшению работы ПИД-регулятора (рис. 4) можно добиться, если пропускать сигнал рассогласования для всех составляющих регулятора через звено

$$\mu = \text{sign}(e) \frac{\exp(\alpha|e|-1)}{\exp(\alpha-1)}. \quad (5)$$

При изменении коэффициента усиления на 10% в ту или иную сторону ухудшение показателей качества регулирования сопоставимо

или меньше в сравнении с работой классического ПИД- или ПИ-регулятора.

Заключение. 1. Характеристики кусочно-линейная (1) и логарифмическая (2) обладают потенциальными возможностями по улучшению качества регулирования ПИД-регулятора. Они в меньшей степени подвержены попаданию в интегральное насыщение и могут устойчиво работать с объектами, постоянная времени которых сопоставима или даже немного меньше времени запаздывания.

2. В качестве метода настройки нелинейного преобразователя может быть использован метод численной минимизации интегрального критерия качества.

3. При выборе нелинейной функции для преобразования ошибки ПИД-регулятора желательно, чтобы при $e = 0$ статическая характеристика имела конечное значение. При использовании ее для всех составляющих регулятора по мере увеличения ошибки e должна увеличиваться $d\mu/de$, в случае нелинейной функции только для интегральной составляющей регулятора по мере увеличения ошибки e $d\mu/de$ должна уменьшаться.

Литература

- Олсон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олсон, Д. Пиани. – СПб.: Невский диалект, 2001. – 557 с.
- Денисенко, В. В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 610 с.
- Хлыпало, Е. И. Расчет и проектирование нелинейных корректирующих устройств в автоматических системах. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 272 с.
- Использование нелинейного преобразования ошибки регулятора в ПИД-алгоритме / Д. А. Гринюк [и др.] // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: Матер. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–18 мая 2012 / Белор. гос. технол. университет. – Минск, 2012. – С. 82–85.
- Гринюк, Д. А. Численное исследование алгоритмов уменьшения интегрального насыщения / Д. А. Гринюк, И. О. Оробей, И. Ф. Кузьмицкий // Труды БГТУ. Сер. VI, Физ.-мат. науки и информатика. – 2005. – Вып. XIII. – С. 140–143.
- Гринюк, Д. А. Модификация интегральных критериев для повышения запаса по устойчивости / Д. А. Гринюк, И. О. Оробей, И. Г. Сухорукова // Труды БГТУ. – 2012. – № 6: Физ.-мат. науки и информатика. – С. 118–121.

Поступила 03.03.2013