

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 681.53

Д. А. Гринюк, И. Г. Сухорукова, Н. М. Олиферович, И. О. Оробей
Белорусский государственный технологический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В КАСКАДНЫХ СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОЙ НАСТРОЙКЕ ЧЕТЫРЕХ ПАРАМЕТРОВ

В статье рассмотрены проблемы синтеза каскадных систем регулирования с применением нелинейных ПИД-регуляторов.

Ввиду увеличения вычислительной мощности микропроцессорных систем и совершенствования методик настройки появилась возможность повсеместно использовать нелинейные регуляторы. Нелинейные ПИД-регуляторы показали свою эффективность и уже применяются в отдельных прикладных решениях. Одной из популярных модификаций данных регуляторов является вариант, основанный на нелинейных преобразованиях сигнала ошибки и сигнала управления. Несмотря на использование различных математических функций для нелинейных преобразований, они имеют подобные зависимости, которые могут быть близко аппроксимированы друг другом. Зависимости с использованием логарифмической функции реализуются и настраиваются проще в технических системах, чем с использованием степенной или гиперболической.

После предварительного анализа для шести способов построения регуляторов была произведена настройка для пяти вариантов динамических характеристик каскадной системы регулирования. Настройка выполнялась численным методом с применением интегрального критерия. Далее были определены некоторые показатели качества и проведен их сравнительный анализ. Также проанализировано поведение систем при ограничении управляющего воздействия. Из всех вариантов для промышленных технических систем может быть рекомендован вариант использования регулятора с нелинейным преобразованием ошибки для всех его составляющих. Итоговые таблицы и графики показывают, что использование нелинейных функций преобразования ошибки и сигнала управления для внутреннего регулятора является нецелесообразным, по крайней мере, для рассмотренного класса динамических объектов. При наличии в объекте нелинейных свойств предлагается использовать антинелинейные преобразования для улучшения качества работы каскадных систем регулирования.

Ключевые слова: нелинейный ПИД-регулятор, каскадные системы управления.

D. A. Hryniuk, I. G. Suhorukova, N. M. Oliferovich, I. O. Orobei
Belarusian State Technological University

USE OF NONLINEAR CONTROLLERS IN CASCADE REGULATION SYSTEMS AT SIMULTANEOUS SETTING OF FOUR PARAMETERS

The article discusses the problems of synthesis of cascade control systems using nonlinear PID controllers.

In view of the increase in the computing power of microprocessor systems and the improvement of tuning techniques, it became possible to use nonlinear regulators everywhere. Nonlinear PID controllers have been shown to be effective and are already used in individual application solutions. One of the popular modifications of the controller data is the option based on nonlinear transformations of the error signal and the control signal. Despite the use of various mathematical functions for nonlinear transformations, they have similar dependencies that can be closely approximated by each other. Dependencies using a logarithmic function are implemented and configured easier in technical systems than using a power or hyperbolic function.

After a preliminary analysis for six ways of constructing regulators, tuning was made for five variants of the dynamic characteristics of a cascade control system. The adjustment was carried out numerically using integral criteria. Then some quality indicators were determined and their comparative analysis was carried out. Also, an analysis of the behavior of systems with a limitation of the control action was performed. Of all the options for industrial technical systems, the option of using a controller with nonlinear error conversions for all its components can be recommended. The resulting tables and graphs show that the use of nonlinear error conversion functions and a control signal for the internal controller is not advisable, at least for the considered class of dynamic objects. If the object has nonlinear properties, it is proposed to use antilinear transformations to improve the quality of cascade control systems.

Key words: nonlinear PID controller, cascade control systems.

Введение. При синтезе современных систем автоматического управления используются различные подходы – от наиболее простых универсальных пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) алгоритмов до модального управления, аналитического конструирования регуляторов и т. д. До недавнего времени нелинейные свойства системы рассматривались как нежелательные элементы, которые усложняют ее поведение и анализ. Наиболее типичным решением является применение различных видов линеаризации, однако для многих типов систем этот подход не приемлем. Универсальные методы анализа устойчивости, такие как функция Ляпунова, во многих случаях сложны и трудоемки. Кроме того, данный метод не гарантирует качества переходных процессов.

В то же время нелинейные корректирующие устройства обладают большим потенциалом. Тем не менее исследования показали, что во многих случаях использование нелинейных законов управления может значительно улучшить параметры проектируемой системы [1–4]. Отдельно стоит упомянуть об удачных попытках использования при управлении технологическими процессами нечетких, нейронных и гибридных алгоритмов, которые, по сути, также являются нелинейными системами [5].

Интерес к применению нелинейных систем управления увеличивался по мере роста вычислительных мощностей компьютерных систем и развития вычислительных методов моделирования. Немаловажным оказалось и развитие нечетких, нейронных, генетических методов оптимизации, методов вероятностного программирования. Сейчас в год выходят десятки статей по развитию и использованию нелинейных ПИД-регуляторов.

Одним из старых направлений исследования нелинейных систем является использование систем управления с переменной структурой. Имеется широкий круг публикаций как общего характера, так и применимых для ПИД-закона регулирования.

Анализ публикаций в области нелинейных систем с использованием ПИД-регуляторов

позволяет разделить их на ряд отдельных направлений:

- новые решения и развитие нелинейных ПИД-регуляторов;
- адаптация и применение нелинейных ПИД-регуляторов в конкретных технических решениях и демонстрация их преимуществ [5];
- развитие многопараметрической оптимизации для настройки нелинейных ПИД-регуляторов;
- развитие методов автоподстройки линейных и нелинейных ПИД-регуляторов.

Очень широко исследуются нелинейные компенсаторы для замкнутых контуров управления, которые формируют отдельное направление развития систем управления. Данное решение скорее является общим структурным улучшением динамики работы замкнутых нелинейных систем, которые применимы при использовании ПИД-регуляторов.

Также изучаются нелинейные функции для устранения недостатков, которые присущи непосредственно ПИД-закону регулирования [1, 2]. Авторы пытаются за счет подбора нелинейных функций ошибки или управляющего воздействия решить проблему улучшения качества переходного процесса, устранить интегральное насыщение, повысить запас устойчивости и т. д.

Стоит отметить, что большинство прикладных регуляторов для технологических процессов в большинстве своем содержали нелинейные элементы. Вследствие наличия ограничения на управляющее воздействие, которое всегда характерно для таких исполнительных механизмов, как клапаны и насосы т. д., возникало интегральное насыщение. Для защиты от данного явления давно применяется алгоритм отключения интегральной составляющей регулятора при вхождении системы в ограничение.

По мере развития данного решения были предложены варианты использования нелинейных функций преобразования ошибки. В литературе присутствуют варианты как использования общего нелинейного преобразования, так и подбор индивидуальных нелинейных преобразований для каждой из составляющих ПИД-регулятора.

Выбор нелинейной функции. Наиболее часто в литературе встречаются нелинейные функции вида

$$K(e, \alpha) = \sinh(\alpha e) = \frac{\exp(\alpha e) + \exp(-\alpha e)}{2}, \quad (1)$$

$$K(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \operatorname{sign}(e), & \text{если } |e| > \delta; \\ \delta^{\alpha-1} e, & \text{если } |e| \leq \delta. \end{cases} \quad (2)$$

В [1, 3] была показана эффективность использования функции

$$K(e, \alpha) = \operatorname{sign}(e) \frac{\ln(1 + \alpha|e|)}{(1 + \alpha)}. \quad (3)$$

Она нашла удачное применение и для ПИД-регуляторов с двумя степенями свободы 2DoF [4, 6].

В целом данные нелинейные функции ошибки (1)–(3) подобны. Они имеют небольшие отличия в статических характеристиках (рис. 1, 2) при определенных подстрочных коэффициентах α и δ в области небольших значений ошибки e . На рис. 1 представлены статические характеристики (1)–(3) для вариантов, которые имеют одинаковое квадратичное отклонение в диапазоне $\pm 2,5$.

Градиентные характеристики нелинейных функций при тех же коэффициентах α и δ имеют большие отличия (рис. 3). Характеристика dK/de для (2) имеет точки разрыва, тогда как (3) обеспечивает большую разницу в dK/de при малом и большом отличии производных. В области больших значений рассогласования в замкнутой системе наблюдаются близкие значения для dK/de функций (1) и (3). Обе эти функции демонстрируют существенные отличия от (2).

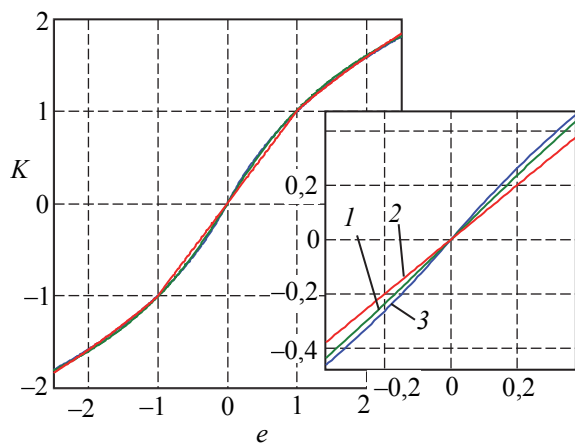


Рис. 1. Статическая характеристика нелинейных функций для малых значений e :
1 – при $\alpha = 1,196$; 2 – при $\alpha = 0,6597, \delta = 1,006$;
3 – при $\alpha = 1$

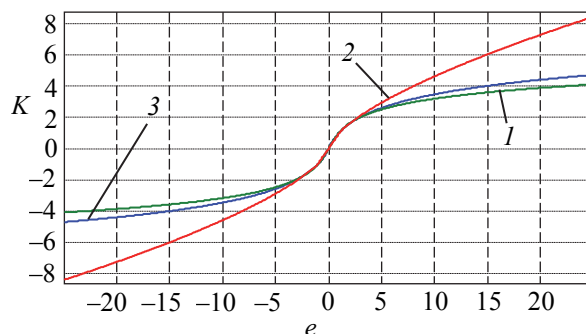


Рис. 2. Статическая характеристика нелинейных функций для больших значений e :
1 – при $\alpha = 1,196$; 2 – при $\alpha = 0,6597, \delta = 1,006$;
3 – при $\alpha = 1$

Можно предположить, что функции (1) и (3) в прикладных задачах будут демонстрировать близкие результаты. Они одинаково решают проблему интегрального насыщения, для чего в первую очередь была предложена функция (3) [1]. В замкнутых контурах регулирования с запаздыванием для (1) при увеличении коэффициента усиления объекта будут возникать автоколебания, которые наблюдаются для (3) [2].

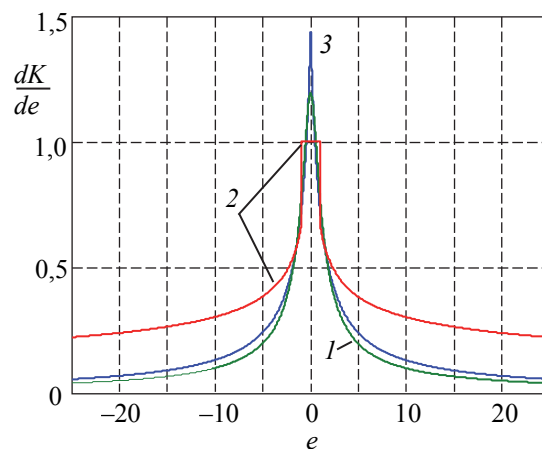


Рис. 3. Градиентная характеристика нелинейных функций для больших значений e :
1 – при $\alpha = 1,196$; 2 – при $\alpha = 0,6597, \delta = 1,006$;
3 – при $\alpha = 1$

Следует отметить некоторые проблемы реализации нелинейных функций. Функции (1) и (2) будут иметь сложности при технической реализации. В стандарте IEC 61131-3 отсутствуют встроенные решения по реализации гиперболических и степенных функций. В приложении SIMULINK программы MATLAB также наблюдаются проблемы вычисления гиперболических функций при малых значениях аргумента для сохранения точности. Но это не преодолимые трудности. Для встроенных систем это не будет составлять проблему.

Однако ПИД-регуляторы используются и в более сложных системах регулирования. К таким можно отнести каскадные системы регулирования (в автоматизированном электроприводе их называют подчиненными). Самая простейшая каскадная система требует настройки двух регуляторов. Внешний регулятор предназначен для обеспечения качества и устойчивости системы, внутренний – для обеспечения быстродействия. В качестве внешнего регулятора обычно используют ПИ- или ПИД-законы, а в качестве внутреннего – обычно П-, иногда ПД-регулятор [7].

В [7] было показано, что каскадные системы улучшают динамику объекта управления в случае, когда динамика внутреннего канала составляет 50–70% от общей динамики. В реальных условиях управления технологическим оборудованием редко имеется возможность выбирать такое соотношение. Но использование данного соотношения позволяет обеспечить хорошую чувствительность при решении поставленной задачи.

Объект исследования. Задача стояла оценить эффективность использования нелинейных регуляторов для каскадных систем управления.

В качестве объекта была выбрана структура, приведенная на рис. 4.

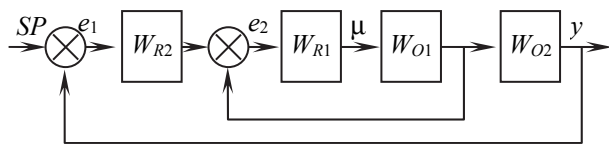


Рис. 4. Структура каскадной системы автоматического регулирования (САР):

SP – сигнал задания; e – сигнал ошибки; μ – сигнал управления; y – выходной сигнал; W_{R1} , W_{R2} – передаточные функции внутреннего (вспомогательного) и внешнего (основного) регулятора соответственно;

W_{O1} , W_{O2} – передаточные функции внутреннего и внешнего объекта соответственно

Для передаточных функций объекта были приняты следующие значения:

$$W_{O1}(s) = \frac{k}{1+100s} \exp(-\tau s), \quad (4)$$

$$W_{O2}(s) = \frac{1}{(1+10s)(1+30s)}. \quad (5)$$

Величина запаздывания существенно влияет на динамические характеристики, запас устойчивости и т. д. Поэтому каскадные системы с разными регуляторами тестировались при значениях запаздывания $\tau = [0,1 \ 1 \ 5 \ 10 \ 50]$. Для нахождения настроек значение $k = 1$.

Поведение систем сложно прогнозируется, особенно если в контуре наблюдается несколько нелинейностей.

По этой причине исследования проводились для объектов с разной величиной запаздывания во внутреннем контуре.

В качестве критерия настройки был выбран интегральный

$$\int_0^{\infty} t^2 |e(t)| dt \rightarrow \min, \quad (6)$$

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

Как было показано выше, вариантов нелинейных преобразований для ПИД-регулятора очень много [8–12]. В данной работе были выбраны несколько вариантов с четырьмя настраиваемыми параметрами.

Сравнение произведено для следующих вариантов построения каскадной системы регулирования:

1) PID + P – линейный внешний регулятор ПИД, внутренний – П-регулятор;

2) NPID + P – П- и И-компоненты с функцией (3) для e_1 внешнего ПИД-регулятора, Д-компонента с линейной функцией ошибки, но внутренний – линейный П-регулятор;

3) NPID + NP – П- и И-компоненты с функцией (3) для e_1 внешнего ПИД-регулятора, Д-компонента с линейной функцией ошибки и e_2 внутреннего П-регулятора с использованием (3);

4) NPID + PN – внешний регулятор как в предыдущем варианте, а внутренний – П-регулятор с функцией (3) для сигнала управления μ ;

5) PID + NP – линейный внешний регулятор ПИД, внутренний – нелинейный П-регулятор с функцией (3) для e_2 ;

6) NPID2 + P – функция (3) для e_1 внешнего ПИД-регулятора, но внутренний – линейный П-регулятор.

Оптимизация настроек производилась путем численного моделирования в MATLAB.

Поведение систем при отсутствии ограничений на управляющее воздействие. Результаты оптимизации без ограничения управляющего воздействия представлены в табл. 1–5 и на рис. 5–8. Время переходного процесса определялось по последнему моменту нахождения за рамками 3% (табл. 1). Значения в табл. 3 вычислялись путем деления интегральной ошибки разных вариантов каскадной системы регулирования на интегральную ошибку для линейного варианта. В табл. 4 абсолютное значение и относительное значение управляющего воздействия μ рассчитывались так же, как интегральная ошибка в табл. 3. Значения в табл. 5 определялись путем ограничения управляющего воздей-

ствия на уровне 60% от максимального значения для линейной системы и моделирования каскадных систем для всех вариантов и делением на значение интегрального критерия при отсутствии ограничений. Для переходных процессов с ограничением управляющего воздействия использована штриховая линия. Для вариантов нелинейных каскадных систем они полностью совпадают с системой без ограничения.

Таблица 1

Время переходного процесса

Тип системы	τ				
	0,1	1	5	10	50
PID + P	1,956	7,130	30,68	54,76	212,0
NPID + P	2,142	13,67	43,70	73,29	221,2
NPID + NP	8,689	13,25	47,60	78,56	377,4
NPID + PN	38,91	26,80	68,54	90,02	222,9
PID + NP	5,940	16,90	77,10	61,89	242,2
NPID2 + P	2,237	12,15	33,86	70,35	222,9

Таблица 2

Перерегулирование

Тип системы	τ				
	0,1	1	5	10	50
PID + P	49,73	2,478	1,741	2,185	1,667
NPID + P	45,19	4,587	7,794	6,047	0,6783
NPID + NP	69,21	0,0487	3,491	4,572	6,884
NPID + PN	0,0269	0,2402	1,661	0,5492	0,3973
PID + NP	8,644	6,8817	0,3691	2,056	0,1599
NPID2 + P	47,64	0,3552	1,091	3,587	1,628

Таблица 3

Относительное значение интегрального отклонения

Тип системы	τ				
	0,1	1	5	10	50
PID + P	1	1	1	1	1
NPID + P	0,7647	1,207	0,9941	0,9720	1,001
NPID + NP	86,94	4,398	1,564	1,196	1,716
NPID + PN	3680	52,74	8,410	3,451	0,9488
PID + NP	18,30	5,171	3,969	1,333	1,071
NPID2 + P	0,7667	2,396	1,126	1,006	1,157

Таблица 4

Максимальное значение управляющего воздействия

Тип системы	τ				
	0,1	1	5	10	50
PID + P	37 299 677	2 595	49,96	13,27	1,684
NPID + P	36 387 670	2 535	56,64	15,39	1,642
NPID + NP	8 646	377,7	28,22	10,89	1,333
NPID + PN	48,39	36,98	4,965	3,550	1,587
PID + NP	9 049	396,9	16,83	9,114	1,397
NPID2 + P	3 115 407	2 050	45,86	14,12	1,529

Таблица 5

Относительное значение интегрального отклонения в случае попадания системы в 60% ограничения управляющего воздействия

Тип системы	τ				
	0,1	1	5	10	50
PID + P	4,293	15,33	5,790	2,987	3,668
NPID + P	1,728	14,51	5,060	2,711	3,663
NPID + NP	1,000	1,000	1,000	1,618	2,137
NPID + PN	1,000	1,000	1,000	1,000	3,866
PID + NP	1,000	1,000	1,000	1,202	3,425
NPID2 + P	1,166	8,438	3,004	2,234	3,176

Представленные результаты показывают не однозначность выбора. В каждом из критериев есть свои лидеры, которые составляют конкуренцию классическому ПИД-регулятору. Однако наблюдается однозначная тенденция по минимизации использования нелинейных преобразований во внутренней замкнутой системе. Во всех случаях это вызывало существенное ухудшение основных параметров качества настройки. На предварительном этапе были использованы еще несколько вариантов нелинейных функций для внутреннего регулятора, но они приводили к еще более затянутому переходному процессу.

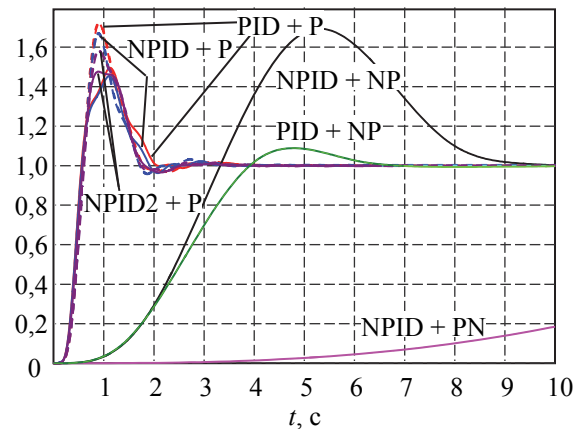


Рис. 5. Переходные процессы при $\tau = 0,1$ с (Штриховая линия соответствует варианту ограничения управляющего воздействия.)

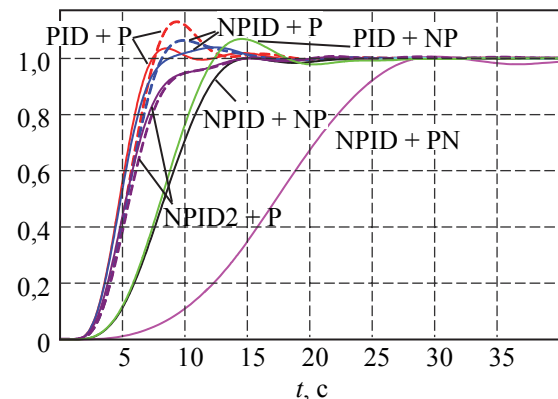
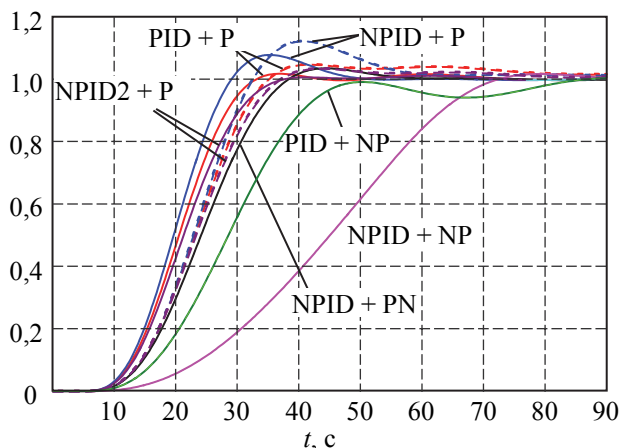
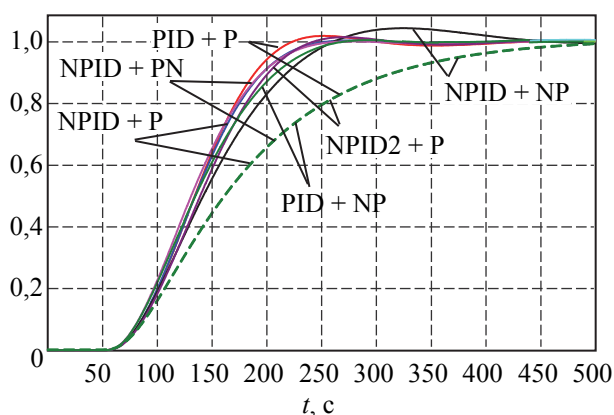


Рис. 6. Переходные процессы при $\tau = 1$ с

Рис. 7. Переходные процессы при $\tau = 5$ сРис. 8. Переходные процессы при $\tau = 50$ с

Для всех вариантов наблюдается очень низкий уровень управляющего воздействия и затянутые переходные процессы. С точки зрения быстродействия лучшие результаты демонстрируют варианты классического регулятора PID + P и нелинейного регулятора NPID + P с нелинейным преобразованием ошибки для пропорциональной и интегральной составляющей. При этом последний вариант показал преимущество по сравнению с PID + P по интегральному критерию почти для всех рассмотренных вариантов динамики. Однако при попадании в ограничение на управляющее воздействие эти варианты построения каскадной системы проявляют существенное ухудшение качества регулирования.

Поведение систем при ограничении на управляющее воздействие. Второй этап выбора настроек путем численной оптимизации проводился для объектов, у которых фиксированный уровень ограничения на уровне в 10 раз выше, чем значение при стационарном состоянии.

Результаты оптимизации без ограничения управляющего воздействия представлены в табл. 6, 7 и на рис. 9.

Таблица 6

Время переходного процесса

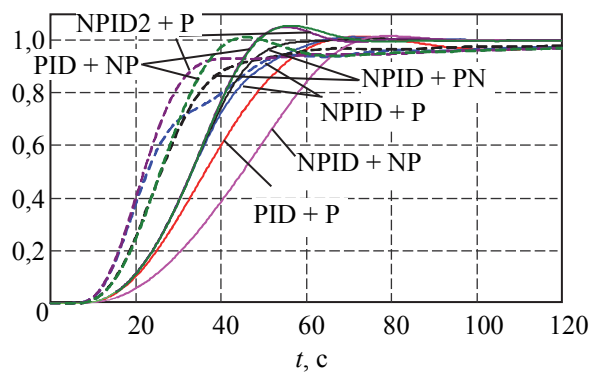
Тип системы	τ				
	0,1	1	5	10	50
PID + P	42,75	56,45	114,1	145,4	226,6
NPID + P	63,76	55,61	58,21	77,72	226,8
NPID + NP	58,53	43,93	51,74	79,59	223,0
NPID + PN	61,01	44,17	68,53	90,02	222,9
PID + NP	42,38	42,78	64,54	59,31	241,3
NPID2 + P	67,27	43,20	60,86	58,01	222,5

Таблица 7

Относительное значение интегрального отклонения

Тип системы	τ				
	0,1	1	5	10	50
PID + P	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
NPID + P	1,2543	1,0002	0,4546	0,3312	1,0100
NPID + NP	1,2594	0,9281	0,3958	0,3494	0,9575
NPID + PN	1,2832	0,9931	0,9764	0,9864	0,9571
PID + NP	1,0419	0,9537	0,4038	0,3469	1,0758
NPID2 + P	1,4545	0,8806	0,4125	0,3281	1,1678

Для переходных процессов без ограничения на управляющее воздействие, но с параметрами, которые были найдены из условия ограничения управляющего воздействия, использована штриховая линия.

Рис. 9. Переходные процессы при $\tau = 5$ с

Графики для остальных значений τ имеют еще меньше визуальных отличий. Это характерно и для величины перерегулирования. Данный тест нивелировал большие отличия в поведении систем. Несколько лучше себя показал вариант NPID2 + P, а затем NPID + P, PID + NP.

Вариант PID + NP, который не проявил себя в предыдущем тесте, в этом продемонстрировал стабильность показателей качества регулирования.

Заключение. Результаты моделирования показали, что нелинейный ПИД-регулятор данного типа следует использовать осторожно с учетом свойств и условий работы объекта управления. Улучшение качества переходного процесса при

отработке сигнала задания наблюдается только при применении нелинейного ПИД-регулятора для внешнего контура. Использование статических нелинейных функций для внутреннего регулятора приводило к ухудшению показателей качества. Результаты применения нелинейного внешнего ПИД-регулятора с внутренним П-регулятором при качественной настройке дают измеримый результат с реализацией внешнего

классического ПИД-регулятора с внутренним ПД-регулятором. При построении каскадной системы регулирования для объектов с ограничением на управляющее воздействие, что характерно для технологических и многих технических систем, оптимальными являются другие решения. По результатам проведенных тестов вариант NPID2 + P продемонстрировал несколько лучшие показатели, чем остальные.

Список литературы

1. Гринюк Д. А., Оробей И. О., Кузьмицкий И. Ф. Численное исследование алгоритмов уменьшения интегрального насыщения // Труды БГТУ. 2005. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 140–143.
2. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting // Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream). Vilnius, 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2017.7950327.
3. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Применение в ПИД-законе регулирования нелинейных функций преобразования ошибки // Труды БГТУ. 2013. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 95–98.
4. Анализ эффективности ПИД-регуляторов с двумя степенями свободы с помощью интегральных критериев / Д. А. Гринюк [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3, Физ.-мат. науки и информатика. 2018. № 2. С. 82–88.
5. Lisauskas S., Udris D., Uznyas D. Direct torque control of induction drive using fuzzy controller // Elektronika Ir Elektrotechnika. 2013. Vol. 19, no. 5. P. 13–16.
6. Complex tuning of the PID controller according to integral criteria / D. Hryniuk [et al.] // Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream). Vilnius, 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2018.8394117.
7. Гринюк Д. А., Оробей И. О., Сухорукова И. Г. Оптимизация каскадной системы регулирования для распределенных объектов на основе интегральных критериев // Труды БГТУ. 2007. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 97–100.
8. Armstrong B., Neevel D., Kusik T. New Results in NPID Control: Tracking, Integral Control, Friction Compensation and Experimental Results // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2001. Vol. 9, issue 2. P. 399–406. DOI: 10.1109/87.911392.
9. Atherton D. P., Benouartes M., Nanka-Bruce O. Design of nonlinear PID controllers for nonlinear plants // 12th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control. Sydney, Australia, 1993. Vol. 26, issue 2. Part 1. P. 125–128.
10. Zheng C., Su Y., Mercorelli P. A simple nonlinear PD control for faster and high-precision positioning of servomechanisms with actuator saturation // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. P. 215–226. DOI: 10.1016/j.ymsp.2018.11.017.
11. Huang H. Nonlinear PID controller and its applications in power plants // International Conference on Power System Technology Proceedings. IEEE. Kunming, China, 2002. Vol. 3. P. 1513–1517. DOI: 10.1109/ICPST.2002.1067784.
12. Wameedh A., Ibraheem K. I. From PID to nonlinear state error feedback controller // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2017. Vol. 8, no. 1. P. 312–322. DOI: 10.14569/IJACSA.2017.080140.

References

1. Hryniuk D. A., Orobei I. O., Kuz'mitskiy I. F. Numerical study of algorithms for decreasing integral saturation. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2005, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 140–143 (In Russian).
2. Hryniuk D., Suhorukova I., Orobei I. Non-linear PID controller and methods of its setting. *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. Vilnius, 2017, pp. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2017.7950327.
3. Suhorukova I. G., Hryniuk D. A., Orobei I. O. Application of non-linear error conversion functions in the PID law. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 95–98 (In Russian).

4. Hryniuk D. A., Suhorukova I. G., Oliferovich N. M., Orobei I. O. Analysis of the efficiency of PID controller with two-degree-of-freedom structure with integrated criteria. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2018, no. 2, pp. 82–88 (In Russian).
5. Lisauskas S., Udris D., Uznys D. Direct torque control of induction drive using fuzzy controller. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 2013, vol. 19, no. 5, pp. 13–16.
6. Hryniuk D., Suhorukova I., Oliferovich N., Orobei I. Complex tuning of the PID controller according to integral criteria. *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream)*. Vilnius, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2018.8394117.
7. Hryniuk D. A., Orobei I. O., Suhorukova I. G. Optimization of a cascade control system for distributed objects based on integral criteria. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2007, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 97–100 (In Russian).
8. Armstrong B., Neevel D., Kusik T. New Results in NPID Control: Tracking, Integral Control, Friction Compensation and Experimental Results. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2001, vol. 9, issue 2, pp. 399–406. DOI: 10.1109/87.911392.
9. Atherton D. P., Benouartes M., Nanka-Bruce O. Design of nonlinear PID controllers for nonlinear plants. *12th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control*. Sydney, Australia, 1993, vol. 26, issue 2, part 1, pp. 125–128.
10. Zheng C., Su Y., Mercorelli P. A simple nonlinear PD control for faster and high-precision positioning of servomechanisms with actuator saturation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, pp. 215–226. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.11.017.
11. Huang H. Nonlinear PID controller and its applications in power plants. *International Conference on Power System Technology Proceedings. IEEE*. Kunming, China, 2002, vol. 3, pp. 1513–1517. DOI: 10.1109/ICPST.2002.1067784.
12. Wameedh A., Ibraheem K. I. From PID to nonlinear state error feedback controller. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 312–322. DOI: 10.14569/IJACSA.2017.080140.

Информация об авторах

Гринюк Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hryniuk@tut.by

Сухорукова Ирина Геннадьевна – старший преподаватель кафедры программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: irina_x@rambler.ru

Олиферович Надежда Михайловна – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oliferovich@belstu.by

Оробей Игорь Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: orobei@tut.by

Information about the authors

Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniuk@tut.by

Suhorukova Irina Gennad'yevna – Senior Lecturer, the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina_x@rambler.ru

Oliferovich Nadezhda Mikhaylovna – assistant lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oliferovich@belstu.by

Orobei Igor' Olegovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: orobei@tut.by

Поступила после доработки 15.04.2020