

Нечеткий супервизор ПИД-регулятора

М. В. Бураков^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-8047-9493, bmv@sknt.ru

А. С. Коновалов^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0001-6127-6789

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Постановка проблемы: ПИД-регуляторы являются основным инструментом автоматизации производства. Однако их настройка традиционными средствами требует выполнения опытов с объектом, что снижает эффективность системы управления при изменении условий работы. Для решения этой проблемы необходимо использовать контур адаптации, автоматически изменяющий параметры регулятора при ухудшении оценок качества. **Цель:** разработка структуры и алгоритма функционирования нечеткого супервизора ПИД-регулятора для повышения качества работы в условиях неконтролируемого изменения параметров объекта. **Результаты:** предлагаются два варианта организации нечеткого супервизорного управления ПИД-регулятором. Первый вариант предполагает непрерывное изменение параметров контроллера на основании информации о текущей ошибке управления. Обучение супервизора происходит в режиме *off line* с помощью генетического алгоритма. Такой подход обеспечивает универсальность применения, однако полученная структура является «черным ящиком». Второй вариант использует оценки качества переходного процесса и может применяться при периодическом изменении входного сигнала. Параметры контроллера изменяются с помощью нечетких правил, имеющих ясную семантику. Показано, что системы с нечетким супервизором позволяют сократить перерегулирование и статическую ошибку, которые могут возникать при изменении параметров объекта управления. Выполнено моделирование работы системы средствами *MatLab Simulink*. **Практическая значимость:** применение ПИД-регуляторов с нечеткими супервизорами может оказаться полезным при проектировании систем управления широким кругом динамических объектов.

Ключевые слова — адаптация, ПИД-регулятор, нечеткая логика, нечеткий супервизор, моделирование, генетический алгоритм.

Цитирование: Бураков М. В., Коновалов А. С. Нечеткий супервизор ПИД-регулятора. *Информационно-управляющие системы*, 2018, № 5, с. 13–21. doi:10.31799/1684-8853-2018-5-13-21

Citation: Burakov M. V., Konovalov A. S. Fuzzy supervisor for PID controller. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 5, pp. 13–21 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-5-13-21

Введение

Использование ПИД-регуляторов для промышленной автоматизации продолжается уже многие годы благодаря простоте проектирования, низкой стоимости и высокой эффективности этого подхода. Традиционный вариант настройки ПИД-регулятора для конкретного объекта предполагает проведение серии опытов, в результате которых выбираются значения трех коэффициентов, входящих в описание закона управления [1].

Современная технологическая база позволяет реализовывать ПИД-регуляторы с помощью микроконтроллеров, что дает дополнительные преимущества в виде возможности перепрограммирования и оперативной коррекции закона управления [2–4].

Поскольку классический ПИД-регулятор является линейным корректирующим звеном, он не может быть эффективен при управлении объектами с существенными нелинейностями или неопределенными параметрами. Поэтому в последние годы интенсивно развиваются нелинейные модификации ПИД-регуляторов на базе нейросетевых и нечетких технологий [5–9].

Использование искусственной нейронной сети (НС) в качестве супервизора ПИД-регулятора допускает разные варианты исполнения. Например, в работе [10] применена НС прямого распространения и алгоритм обратного распространения ошибки, в [11] — НС Хопфилда, в [12] — радикально-базисная НС. Однако использование НС и нейронечетких систем связано с реализацией алгоритмов обучения, в том числе — алгоритмов эволюционной оптимизации [13, 14]. В результате полученная структура является «черным ящиком», и происходит потеря семантики, характерной для нечетких правил.

Нечеткие супервизоры ПИД-регуляторов образуют важный класс систем прямого адаптивного управления, которые не требуют применения идентификационных процедур. Нечеткие супервизоры ПИД-регуляторов позволяют придать системе управления адаптивные свойства при сохранении простой структуры закона управления. Хотя идея нечеткого супервизора возникла достаточно давно [15, 16], ее конкретные воплощения могут отличаться большим разнообразием, которое проявляется в способах получения информации от объекта управления, в обработке этой информации по нечетким правилам и

в способе коррекции коэффициентов ПИД-регулятора.

Нечеткие супервизоры в настоящее время применяют в таких областях, как электротехника [17], робототехника [18], автомобилестроение [19] и т. д.

В настоящей работе анализируются различные варианты организации нечеткого супервизорного управления. На основании сделанного анализа предлагаются два базовых варианта организации супервизорной системы, которые исследуются с помощью компьютерного моделирования.

Варианты организации нечеткого супервизора

Закон управления классического ПИД-регулятора описывается формулой

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt},$$

где $u(t)$ и $e(t)$ — сигнал управления и ошибка управления; k_p , k_d и k_i — настраиваемые коэффициенты регулятора.

Идея нечеткого супервизора заключается в описании коэффициентов ПИД-регулятора как функций времени, значения которых определяются нечеткими логическими правилами. В результате возникает двухуровневая система управления.

Нечеткий супервизор образует верхний уровень системы управления, на нижнем уровне которой располагается ПИД-регулятор. Концептуально супервизор является нечетким логическим регулятором (НЛР), содержащим все необходимые компоненты: блок фаззификации, базу правил и блок дефаззификации [20]. Таким образом, при проектировании супервизора необходимо выбрать его вход-выходные переменные, определить их лингвистическое описание и составить нечеткие логические правила для описания закона управления.

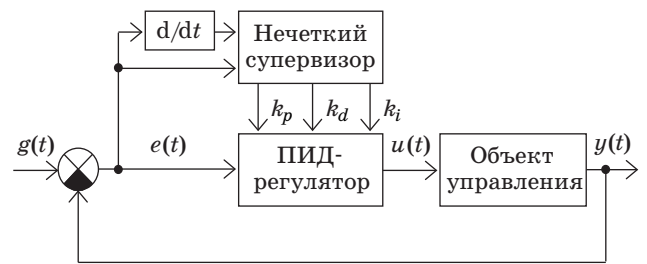
Один из вариантов работы нечеткого супервизора, рассмотренный, например, в статьях [21, 22], непрерывно использует на входе информацию о поведении ошибки управления и ее производной. Таким образом, здесь описывается определение коэффициентов регулятора в виде

$$k_p = F_1(e, \dot{e}); \quad k_d = F_2(e, \dot{e}),$$

где F_1, F_2 — нечеткие функции.

Структура супервизорной системы представлена на рис. 1.

Для описания каждой из входных переменных супервизора в работе [21] использованы линг-



■ Рис. 1. Вариант организации нечеткого супервизора

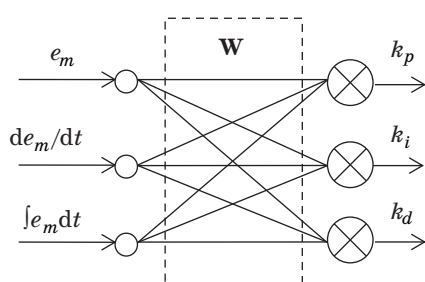
■ Fig. 1. The variant of the organization of the fuzzy supervisor

вистические переменные (ЛП), имеющие по пять термов с треугольными функциями принадлежности, равномерно распределенными по нормализованным базовым шкалам. База правил состоит из трех частей — отдельно для каждого коэффициента k_p , k_d и k_i , так что всего используется 75 управляющих правил. Управляющие правила основаны на анализе свойств переходного процесса в системе. Подобный подход впервые изложен [22] для описания правил нечеткого регулятора. Например, «если ошибка управления большая и медленно изменяется, то k_p должен быть большим», иначе, «если ошибка управления малая и быстро изменяется, то k_p должен быть малым». Однако если для НЛР управляющие правила имеют ясную семантику, то для супервизора семантика большинства из 75 правил неоднозначна. Еще больше эта ситуация ухудшается при использовании семи термов для описания ошибки и ее производной [23]. Здесь количество правил увеличивается до 343, соответственно, растет неопределенность их формулировки. Кроме того, при управлении коэффициентами регулятора важную роль может играть интеграл ошибки, поэтому необходимо описать зависимость

$$k_i = F_3(e, \dot{e}).$$

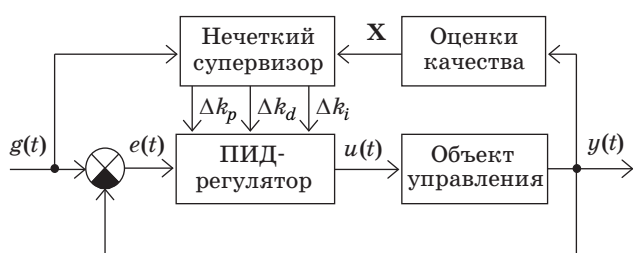
Это еще более усложняет задачу составления правил, делая ее практически невозможной.

Таким образом, обеспечение адекватного выбора закона управления коэффициентами ПИД-регулятора оказывается возможным только при использовании процедур оптимизации. Допустим, что термы лингвистических переменных, описывающих входы и выходы нечеткого супервизора, образуют нечеткое разбиение соответствующих базовых шкал, а для дефаззификации используется метод центра тяжести. В этом случае значения коэффициентов на выходе нечеткой системы линейно зависят от ее входов [24]. Тогда реализовать отображение вход-выход можно с помощью линейной НС, представленной на рис. 2.



■ **Рис. 2.** Описание супервизора как линейной нейронной сети

■ **Fig. 2.** Description of supervisor as linear neural network



■ **Рис. 3.** Нечеткий супервизор с оценкой качества переходного процесса

■ **Fig. 3.** Fuzzy supervisor with an assessment of the quality of the transient process

Матрица весов W на рис. 2 должна быть найдена в процессе оптимизации, которая может быть выполнена с помощью генетического алгоритма [13, 25] или другого метода глобального поиска.

Второй вариант схемы нечеткого супервизора (рис. 3) реализует определение коэффициентов регулятора в виде

$$k_p = F_1(\mathbf{X}); k_d = F_2(\mathbf{X}); k_i = F_3(\mathbf{X}),$$

где \mathbf{X} — вектор оценок параметров переходного процесса, образующий вход супервизора.

Этот вариант нечеткого супервизора предполагает инкрементальное изменение коэффициентов ПИД-регулятора на основании построения оценок качества переходного процесса, таких как статическая ошибка, перерегулирование и время нарастания. Предполагается, что входное воздействие $g(t)$ носит периодический характер. Целевыми значениями являются малое перерегулирование и малая статическая ошибка при малом времени нарастания.

Как известно, коэффициенты ПИД-регулятора оказывают различное влияние на параметры переходного процесса (табл. 1).

На основании табл. 1 можно сформулировать примерные правила изменения коэффициентов ПИД-регулятора:

■ **Таблица 1.** Эффекты при увеличении коэффициентов ПИД-регулятора

■ **Table 1.** Effects from increasing PID controller ratios

Коэффициент	Время нарастания T_n	Статическая ошибка E	Перерегулирование $P, \%$
k_p	Уменьшает	Уменьшает	Увеличивает
k_d	Не влияет	Не влияет	Уменьшает
k_i	Уменьшает	Устраняет	Увеличивает

- если статическая ошибка большая, то k_i следует увеличивать;
- если статическая ошибка очень большая, то k_p следует увеличивать;
- если перерегулирование большое, то k_d следует увеличивать;
- если перерегулирование очень большое, то k_p следует уменьшать;
- если перерегулирование малое, то k_p следует увеличивать.

Последнее правило позволяет сократить время нарастания.

Будем считать, что объект управления устойчив и переходный процесс гарантированно заканчивается за время T , тогда

$$E = g(T) - y(T);$$

$$P = (y_{\max} - y(T)) \times 100 \%$$

Таким образом, по результатам сделанного анализа могут быть рассмотрены два варианта: супервизор непрерывного действия и супервизор периодического действия.

Моделирование работы нечеткого супервизора непрерывного действия

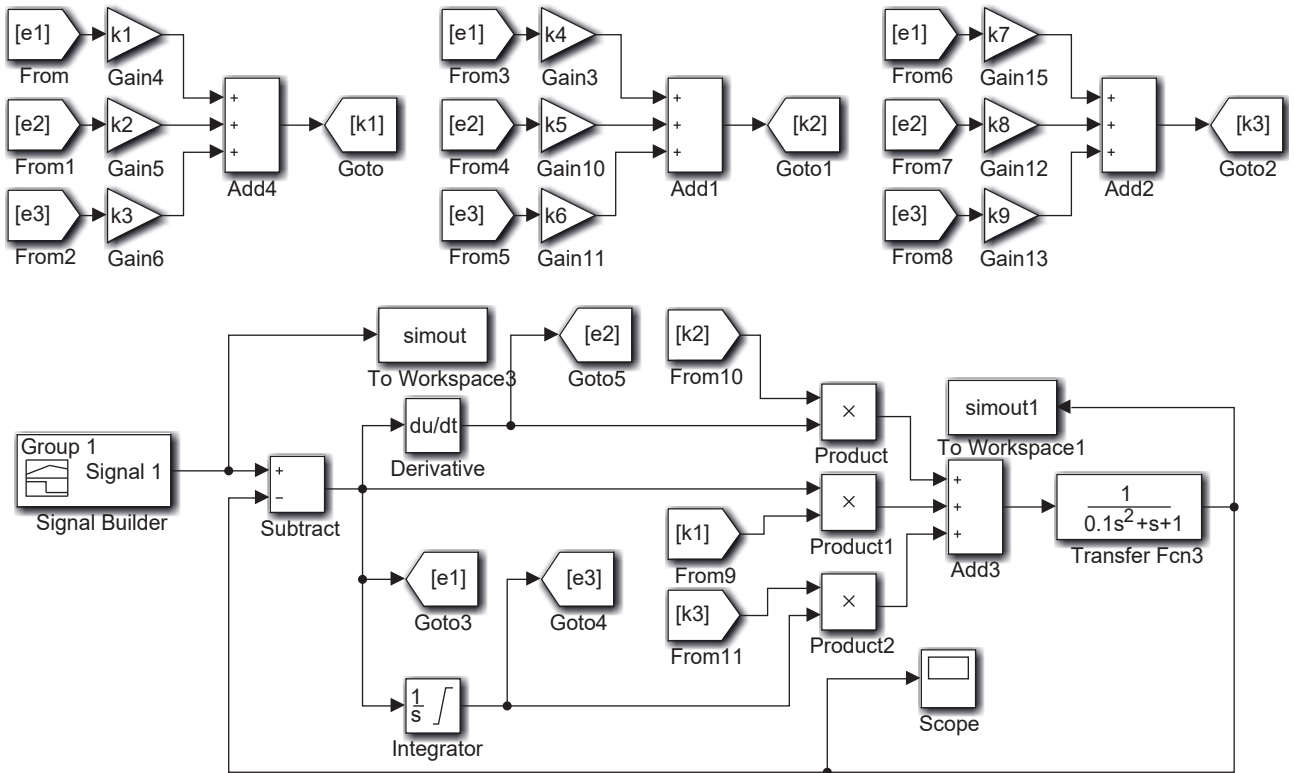
Схема эксперимента в Simulink MatLab представлена на рис. 4 (блоки *simout* используются при генетическом обучении).

При настройке регулятора использовался объект управления, заданный с помощью передаточной функции W_1 . При тестировании использовались варианты объектов с передаточными функциями W_2, W_3 , где

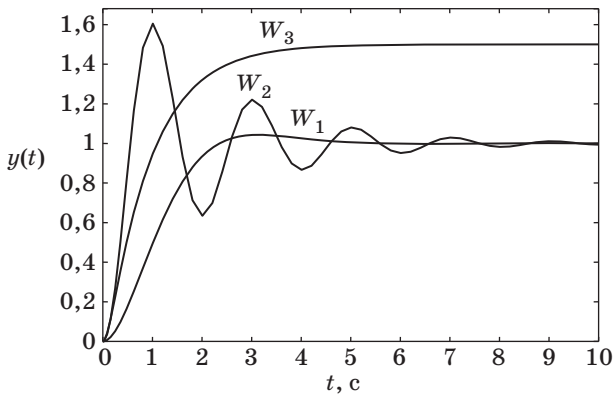
$$W_1(s) = \frac{1}{0,1s^2 + s + 1}; \quad W_2(s) = \frac{1,5}{0,5s^2 + s + 1};$$

$$W_3(s) = \frac{1}{0,1s^2 + 0,1s + 1}.$$

Динамические характеристики этих объектов иллюстрирует рис. 5.



■ **Рис. 4.** Блок-схема супервизора непрерывного действия
 ■ **Fig. 4.** Block diagram of continuous operation supervisor

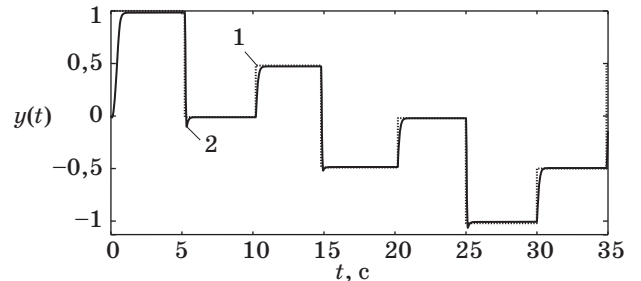


■ **Рис. 5.** Переходные характеристики объектов
 ■ **Fig. 5.** Transient processes for plants

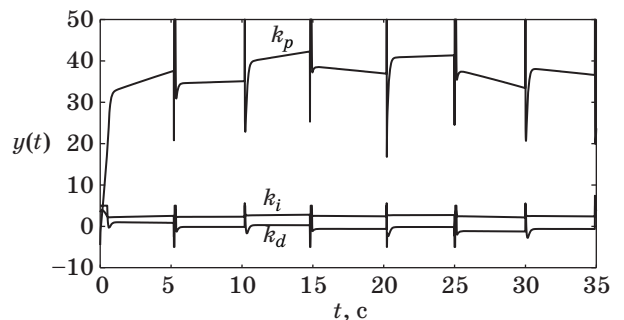
После обучения была получена следующая матрица весовых коэффициентов супервизора:

$$W = \begin{bmatrix} -4,5 & 3,42 & 76 \\ 4,25 & 0,32 & 9,5 \\ 73,8 & 4,88 & 0,51 \end{bmatrix}$$

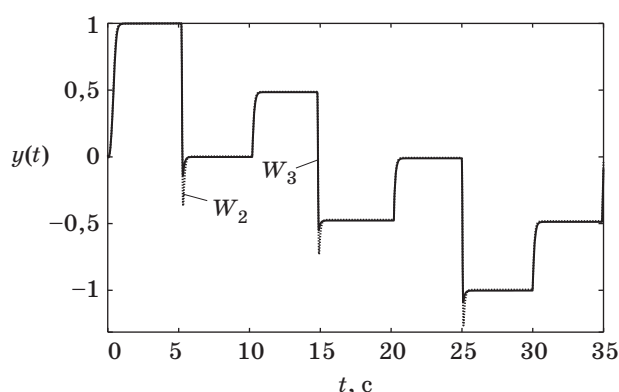
Реакция системы с супервизором для объекта W_1 показана на рис. 6. На рис. 7 представлены графики изменения коэффициентов регулятора



■ **Рис. 6.** Переходный процесс в системе с супервизором: 1 — входной сигнал; 2 — выход системы
 ■ **Fig. 6.** Transient processes in system with supervisor: 1 — input signal; 2 — system output



■ **Рис. 7.** Изменение коэффициентов ПИД-регулятора
 ■ **Fig. 7.** Changing of PID controller coefficients



■ **Рис. 8.** Переходные процессы для объектов
 ■ **Fig. 8.** Transient processes for plants

во время переходного процесса. На рис. 8 показаны переходные процессы для тестовых объектов W_2 и W_3 . Качество работы остается удовлетворительным, хотя динамика объектов управления существенно различна (см. рис. 5).

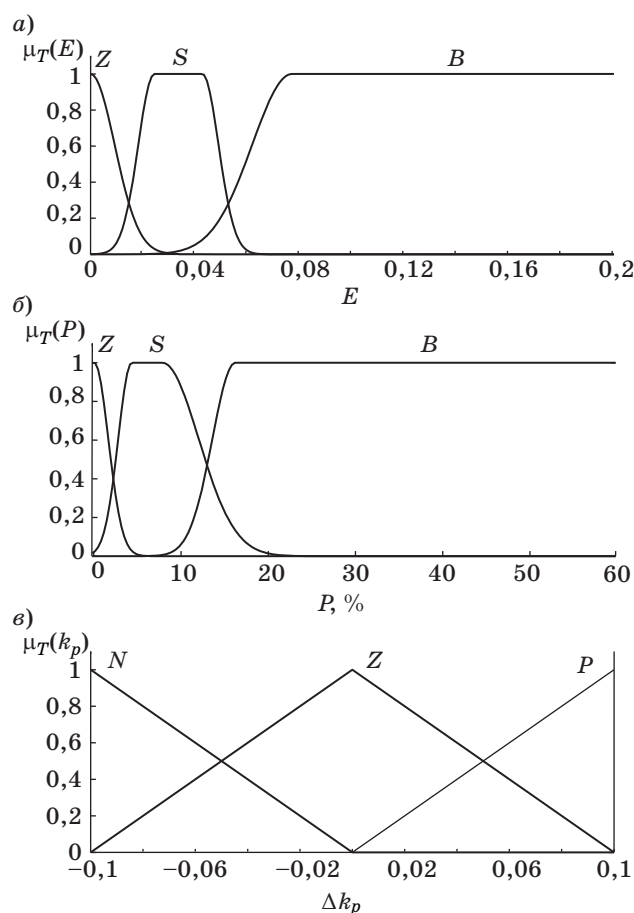
Моделирование работы нечеткого супервизора периодического действия

Лингвистическое описание входных переменных нечеткого супервизора в Simulink MatLab показано на рис. 9, а и б (где $\mu_T(x)$ — степень принадлежности значения x к терму T соответствующей лингвистической переменной; Z, S и B — сокращения наименований термов *Zero, Small, Big*).

Выходные переменные описываются с помощью трех термов с треугольной функцией принадлежности и лингвистическими метками N, Z, P (*Negative, Zero, Positive*). На рис. 9, в представлено описание для пропорционального коэффициента. Описание для дифференциального и интегрального коэффициентов аналогично, но размер базовой шкалы — 0,02 и 0,01 соответственно.

Максимальное количество управляющих правил равно мощности декартова произведения терм-множеств посылок правил. Так как для описания E и P использованы по три терма, всего получается девять управляющих правил нечеткого супервизора (табл. 2).

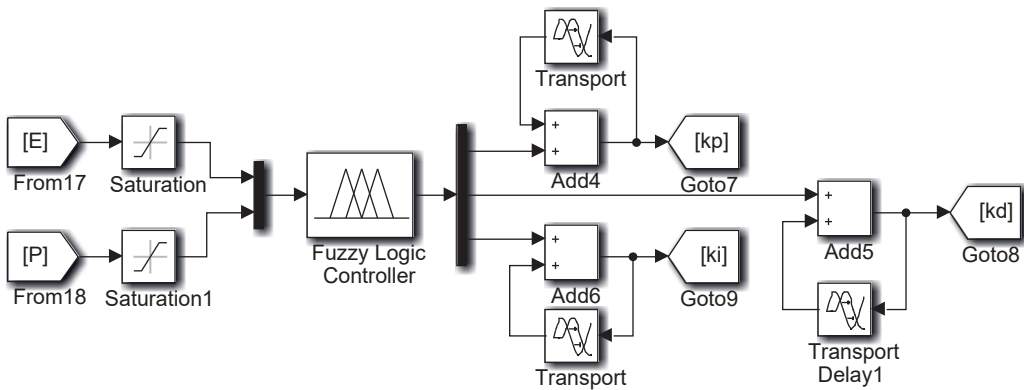
Как показало моделирование, непосредственно использовать оценку времени нарастания переходного процесса нет необходимости, потому что этот параметр зависит от значения максимально допустимого перерегулирования — при малом перерегулировании можно увеличивать пропорциональный коэффициент, уменьшая тем самым время нарастания.



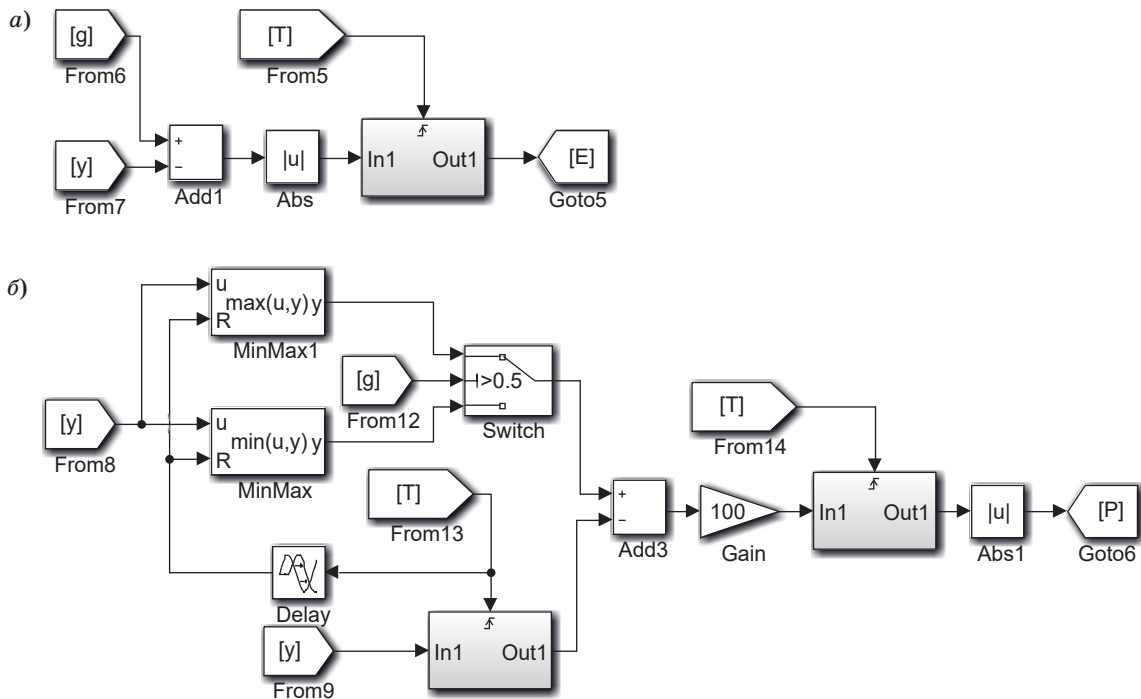
■ **Рис. 9.** Нечеткое описание статической ошибки (а); перерегулирования (б); приращения коэффициента ПИД-регулятора (в)
 ■ **Fig. 9.** Fuzzy description of static error (a); of overshoot (б); of the increment of the PID controller coefficient (в)

■ **Таблица 2.** Таблица лингвистических правил
 ■ **Table 2.** Table of linguistic rules

E	P	k_p	k_d	k_i
Z	Z	Z	Z	Z
Z	S	Z	Z	Z
Z	B	N	P	Z
S	Z	Z	Z	P
S	S	Z	Z	P
S	B	Z	P	P
B	Z	P	Z	P
B	S	P	Z	P
B	B	P	P	P



■ **Рис. 10.** Блок-схема нечеткого супервизора
 ■ **Fig. 10.** Block diagram of fuzzy supervisor



■ **Рис. 11.** Блок-схема для определения статической ошибки (а) и перерегулирования (б)
 ■ **Fig. 11.** Block diagram for determining static error (a) and overshoot (б)

На рис. 10 показана реализация нечеткого супервизора в MatLab. На рис. 11, а и б приведены блоки извлечения качественных характеристик переходного процесса.

Для оценки качества работы нечеткого супервизора рассмотрим задачу управления объектом, заданным колебательным звеном:

$$W(s) = \frac{0,8}{0,02s^2 + 0,025s + 1}$$

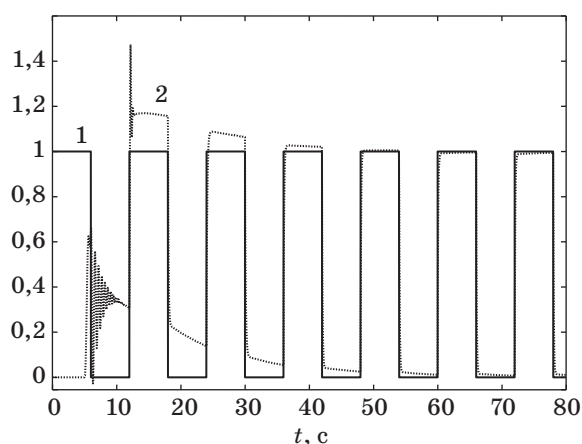
Коэффициенты ПИД-регулятора должны быть настроены таким образом, чтобы уменьшить ста-

тическую ошибку, перерегулирование и колебательность.

Эта задача решается вполне удовлетворительно (рис. 12). Значительные колебания на первых секундах вызваны тем, что начальные значения коэффициентов сильно отличаются от требуемых значений.

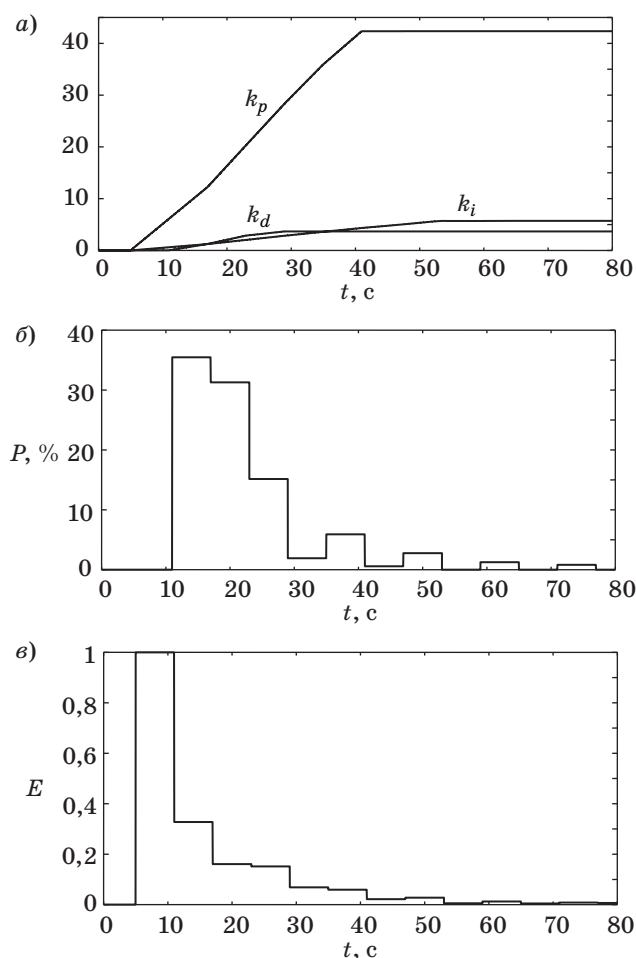
При нулевых начальных значениях коэффициентов регулятора после каждого цикла регулирования происходит их коррекция, которая прекращается по достижении хорошего качества регулирования (рис. 13, а).

На рис. 13, б и в показаны изменения оценок качества во время переходного процесса.



■ **Рис. 12.** Переходные процессы в системе с нечетким супервизором: 1 — задающее воздействие; 2 — выход системы

■ **Fig. 12.** Transient processes in a system with a fuzzy supervisor: 1 — driving impact; 2 — system output



■ **Рис. 13.** Изменение коэффициентов ПИД-регулятора (а); оценки перегулирования (б); статической ошибки (в)

■ **Fig. 13.** Changing of PID controller coefficients (а); in the estimation of overshoot (б); of static error (в)

Периодическое входное воздействие (см. рис. 12) может использоваться на этапе настройки регулятора, так что нечеткий супервизор заменяет здесь традиционные алгоритмы, такие как метод Зиглера — Николса [1].

Заключение

Несмотря на все более активное внедрение нечетких и нейросетевых регуляторов, традиционные ПИД-регуляторы продолжают оставаться наиболее популярным средством автоматизации в промышленности. Использование нечетких супервизоров значительно расширяет возможности ПИД-регуляторов, придавая им адаптивные свойства.

На практике могут быть использованы две схемы супервизорного управления: с непрерывной коррекцией коэффициентов на основании информации об ошибке управления и с периодической коррекцией на основании оценок качества переходного процесса.

Как показали проведенные эксперименты, в схеме с непрерывной коррекцией можно рассматривать гипотезу о линейности нечетких управляющих правил, что позволяет эффективно использовать для их описания линейную НС с генетической настройкой. Такой подход не накладывает ограничений на вид входного сигнала и обеспечивает робастность регулятора.

В случае периодического изменения входного сигнала для работы супервизора могут быть использованы прямые оценки качества переходного процесса. За счет этого оказывается возможным сформулировать правила коррекции параметров регулятора, имеющие ясную семантику. Проведенные вычислительные эксперименты показали хорошее качество работы супервизорной системы.

Применение нечетких супервизоров для ПИД-регуляторов может оказаться полезным при проектировании систем управления широким кругом динамических объектов. Реализация подобной системы на базе микроконтроллера не вызывает технических трудностей и незначительно увеличивает стоимость системы управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-01-00076).

Литература

1. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers // Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759–768.
2. Visioli A. Practical PID Control. — London, UK: Springer, 2006. — 314 p.

3. **Astrom K. J., Hagglund T.** Advanced PID Control. — ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. — 460 p.
4. **Бураков М. В., Коновалов А. С.** Модификация предиктора Смита для линейного объекта с переменными параметрами // Информационно-управляющие системы. 2017. № 4. С. 25–34. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.25
5. **Ketata R., Geest D., Titli D. A.** Fuzzy Controller: Design, Evaluation, Parallel and Hierarchical Combination with a PID Controller // Fuzzy Sets and Systems. 1995. Vol. 71. P. 113–229.
6. **Omatu S., Yoshioka M., Fujinaka T.** Neuro-PID Control for Electric Vehicle // Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics. 2011. Vol. 15. N 7. P. 846–852.
7. **Burakov M. V., Kurbanov V. G.** Fuzzy PID Controller for Nonlinear Plant // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. N 9. P. 5745–5748.
8. **Burakov M. V., Kurbanov V. G.** Neuro-PID Control for Nonlinear Plants with Variable Parameters // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. N 4. P. 1226–1229.
9. **Karray F., Gueaieb W., Al-Sharhan S.** The Hierarchical Expert Tuning of PID Controllers using Tools of Soft Computing // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part b: Cybernetics. 2002. Vol. 32. N 1. P. 77–90.
10. **Patel R., Kumar V.** Multilayer Neuro PID Controller based on Back Propagation Algorithm // Procedia Computer Science. 2015. Vol. 54. P. 207–214.
11. **Du W., Zhao X., Lv F., Du H.** The Design of PID Controller based on Hopfield Neural Network // TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. 2014. Vol. 12. N 4. P. 3185–3192.
12. **Hasanpour H., Heydari Beni M., Askari M.** Adaptive PID Control based on RBF NN for Quadrotor // International Research Journal of Applied and Basic Sciences. 2017. Vol. 11. N 2. P. 177–186.
13. **Бураков М. В., Коновалов А. С., Яковец О. Б.** Эволюционный синтез нечетких регуляторов // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6. С. 28–33. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.28
14. **Dagher K. A., Al-Araji A. S.** Design of an Adaptive PID Neural Controller for Continuous Stirred Tank Reactor based on Particle Swarm Optimization // Al-Khwarizmi Engineering Journal. 2013. Vol. 9. N 4. P. 46–53.
15. **Lee C. C.** Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller. Part I // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1990. Vol. 20. N 2. P. 404–418.
16. **Zhao Z.-Y., Tomizuka M., Isaka S.** Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers // IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics. 1993. Vol. 23. N 5. P. 1392–1398.
17. **Ali M., Khan S., Waleed M.** Application of an Intelligent Self-Tuning Fuzzy PID Controller on DC-DC Buck Converter // International Journal of Advanced Science and Technology. 2012. Vol. 48. P. 139–147.
18. **Qiu C., Huang Y.** The Design of Fuzzy Adaptive PID Controller of Two-Wheeled Self-Balancing Robot // International Journal of Information and Electronics Engineering. 2015. Vol. 5. N 3. P. 193–197.
19. **Ebrahimi N., Gharaveisi A.** Optimal Fuzzy Supervisor Controller for an Active Suspension System // International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE). 2012. Vol. 2. N 4. P. 36–39.
20. **Passino K. M., Yurkovich S.** Fuzzy Control. — Addison Wesley Longman Inc., 1998. — 500 p.
21. **Song Z., Wang Y., Yuan M.** The Application of Fuzzy-PID Control used in the Control of Car Distance // World Journal of Modelling and Simulation. 2007. Vol. 3. N 2. P. 141–148.
22. **Macvicar-Whelan P. J.** Fuzzy Sets for Man-Machine Interaction // Int. J. Man-Mach. Studies. 1976. Vol. 8. P. 687–697.
23. **Jin J., Huang H., Sun J., Pang Y.** Study on Fuzzy Self-Adaptive PID Control System of Biomass Boiler Drum Water // Journal of Sustainable Bioenergy Systems. 2013. Vol. 3. P. 93–98.
24. **Chen G., Pham T. T.** Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems. — London, UK: CRC Press, 2001. — 316 p.
25. **Бураков М. В., Яковец О. Б.** Нечеткое управление силовым гироскопическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 10. С. 157–166.

UDC 681.5

doi:10.31799/1684-8853-2018-5-13-21

Fuzzy supervisor for PID controllerM. V. Burakov^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-8047-9493, bmv@sknt.ruA. S. Konovalov^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-6127-6789^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: PID regulators are an important industrial automation tool. However, the traditional ways of their customization involve experiments with the plant, reducing the control system efficiency when the operating conditions change. To solve this problem, you have to use an adaptation loop which automatically changes the regulator parameters when the quality indicators deteriorate.

Purpose: Developing a structure and an algorithm for a fuzzy supervisor of a PID controller in order to improve the operation quality in the context of uncontrolled changes in the plant parameters. **Results:** We propose two options for organizing a fuzzy supervisor. The first option involves continuous changing of the controller parameters based on the information about the current control error. The supervisor is trained offline with the help of a genetic algorithm. This approach makes the application universal, but the resulting structure is a «black box». The second option is using transient process quality estimates; it can be used when the input signal periodically changes. The controller parameters are changed using fuzzy rules with clear semantics. It is shown that systems with a fuzzy supervisor can reduce the overshoot or static error which both can occur when the control object parameters change. The system operation was simulated using MatLab Simulink. **Practical relevance:** The use of PID controllers with fuzzy supervisors can be useful in the design of control systems for a wide range of dynamic plants.

Keywords — adaptation, PID controller, fuzzy logic, fuzzy supervisor, modeling, genetic algorithm.

Citation: Burakov M. V., Konovalov A. S. Fuzzy supervisor for PID controller. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 5, pp. 13–21 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-5-13-21

References

- Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum Settings for Automatic Controllers. *Trans. ASME*, 1942, vol. 64, pp. 759–768.
- Visioli A. *Practical PID Control*. Springer, London, UK, 2006. 314 p.
- Astrom K. J., Hagglund T. *Advanced PID Control*. ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society), 2006. 460 p.
- Burakov M. V., Konovalov A. S. Modification of Smith Predictor for a Linear Plant with Changeable Parameters. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 4, pp. 25–34 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.25
- Ketata R., Geest D., Titli D. A. Fuzzy Controller: Design, Evaluation, Parallel and Hierarchical Combination with a PID Controller. *Fuzzy Sets and Systems*, 1995, vol. 71, pp. 113–229.
- Omatu S., Yoshioka M., Fujinaka T. Neuro-PID Control for Electric Vehicle. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 2011, vol. 15, no. 7, pp. 846–852.
- Burakov M. V., Kurbanov V. G. Fuzzy PID Controller for Nonlinear Plant. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, vol. 11, no. 9, pp. 5745–5748.
- Burakov M. V., Kurbanov V. G. Neuro-PID Control for Nonlinear Plants with Variable Parameters. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 4, pp. 1226–1229.
- Karray F., Gueaieb W., Al-Sharhan S. The Hierarchical Expert Tuning of PID Controllers using Tools of Soft Computing. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part b: Cybernetics*, 2002, vol. 32, no. 1, pp. 77–90.
- Patel R., Kumar V. Multilayer Neuro PID Controller based on Back Propagation Algorithm. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 54, pp. 207–214.
- Du W., Zhao X., Lv F., Du H. The Design of PID Controller Based on Hopfield Neural Network. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 12, no. 4, pp. 3185–3192.
- Hasanpour H., Heydari Beni M., Askari M. Adaptive PID Control Based on RBF NN for Quadrotor. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 177–186.
- Burakov M. V., Konovalov A. S., Yakovets O. B. Evolutionary Design of Fuzzy Controllers. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 6, pp. 28–33 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.28
- Dagher K. A., Al-Araji A. S. Design of an Adaptive PID Neural Controller for Continuous Stirred Tank Reactor based on Particle Swarm Optimization. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 2013, vol. 9, no. 4, pp. 46–53.
- Lee C. C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller. Part I. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1990, vol. 20, no. 2, pp. 404–418.
- Zhao Z.-Y., Tomizuka M., Isaka S. Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics*, 1993, vol. 23, no. 5, pp. 1392–1398.
- Ali M., Khan S., Waleed M. Application of an Intelligent Self-Tuning Fuzzy PID Controller on DC-DC Buck Converter. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 2012, vol. 48, pp. 139–147.
- Qiu C., Huang Y. The Design of Fuzzy Adaptive PID Controller of Two-Wheeled Self-Balancing Robot. *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 193–197.
- Ebrahimi N., Gharaveisi A. Optimal Fuzzy Supervisor Controller for an Active Suspension System. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 2012, vol. 2, no. 4, pp. 36–39.
- Passino K. M., Yurkovich S. *Fuzzy Control*. Addison Wesley Longman Inc., 1998. 500 p.
- Song Z., Wang Y., Yuan M. The Application of Fuzzy-PID Control used in the Control of Car Distance. *World Journal of Modelling and Simulation*, 2007, vol. 3, no. 2, pp. 141–148.
- Macvicar-Whelan P. J. Fuzzy Sets for Man-Machine Interaction. *Int. J. Man-Mach. Studies*, 1976, vol. 8, pp. 687–697.
- Jin J., Huang H., Sun J., Pang Y. Study on Fuzzy Self-Adaptive PID Control System of Biomass Boiler Drum Water. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 2013, vol. 3, pp. 93–98.
- Chen G., Pham T. T. *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems*. CRC Press, London, UK, 2001. 316 p.
- Burakov M. V., Yakovets O. B. Fuzzy Control of Power Gyroscopic Unit. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2015, vol. 58, no. 10, pp. 157–166 (In Russian).