

ИНФОРМАТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 681.51

Д. С. Карпович, А. Н. Шумский, В. В. Сарока
Белорусский государственный технологический университет

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

Актуальность задачи синтеза систем управления беспилотным летательным аппаратом характеризуется сложностью их математической модели и большим числом экспериментально определяемых параметров.

Сформулирована методика проектирования модели системы регулирования с нечетким логическим контроллером. Приведены результаты имитационного моделирования системы с нечетким логическим контроллером.

Выполнен синтез и анализ системы управления беспилотным летательным аппаратом Гриф-1 в канале продольного движения (управление углом тангажа). Исследование динамики нечеткой системы управления проводилось в среде графического моделирования Simulink пакета Matlab. На основании полученных результатов моделирования выбраны рациональные алгоритмы управления для продольного канала движения беспилотного летательного аппарата.

Были получены функции принадлежности терм-множествам для входных и выходной лингвистических переменных. Установлена взаимосвязь между входными и выходными лингвистическими переменными в виде базы правил, а также выполнена визуализация поверхности нечеткого вывода.

Нечеткий логический вывод позволяет использовать для управления информацию качественного характера, которую невозможно формализовать при реализации традиционных законов регулирования. При этом нечеткое регулирование оказывается малочувствительным к возмущениям в определенном диапазоне и демонстрирует лучшие характеристики по сравнению с классическими регуляторами.

В данной статье предлагается подход синтеза нечеткого закона управления беспилотным летательным аппаратом по упрощенной его динамической модели и минимальной исходной информации о параметрах.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, система управления, нечеткий регулятор, математическая модель, лингвистическая переменная.

D. S. Karpovich, A. N. Shumski, V. V. Saroka
Belarusian State Technological University

CONTROL SYSTEM OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE USING THE THEORY OF FUZZY SETS

The urgency of the problem of synthesis of control systems of an unmanned aerial vehicle depends on the complexity of the mathematical model and a large number of experimentally determined parameters.

Formulated technique of designing the control system model with fuzzy logic controller. The results of simulation modeling the system with fuzzy logic controller are presented.

The synthesis and analysis of control systems of unmanned aerial vehicle Grif-1 in the channel longitudinal motion (pitch angle control). The investigation of the dynamics of fuzzy control system was carried out in the environment of graphic modeling Simulink Matlab package. Based on the simulation results rational control algorithms selected for the longitudinal motion of channel unmanned aerial vehicle were obtained.

Membership function term set for the input and output linguistic variables were obtained. The correlation between the input and output linguistic variables in a database instilled was found. As well as visualization of the surface of the fuzzy inference.

Fuzzy logic conclusion can be used to control the qualitative information that cannot be formalized in the implementation of regulation of traditional laws. This fuzzy regulation is insensitive to disturbances within a specific range and exhibits the best characteristics in comparison with classical regulators.

This article proposes an approach of synthesis of fuzzy control law of an unmanned aerial vehicle according to the simplified dynamic model and its minimum initial information about the options.

Key words: an unmanned aerial vehicle, control system, fuzzy control, mathematical model, linguistic variable.

Введение. Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) – летательный аппарат без экипажа на борту [1]. Как правило, основная задача, возлагаемая на комплексы БПЛА, – проведение разведки труднодоступных районов, в которых получение информации обычными средствами, включая авиаразведку, затруднено или же подвергает опасности здоровье и даже жизнь людей. Информация, собранная боровыми средствами мониторинга, должна передаваться потребителю либо сохраняться на борту в обработанном виде или сплошным массивом данных. Наибольшее распространение в настоящее время получили малоразмерные комплексы ближнего радиуса действия, что обусловлено их невысокой ценой и серьезной экономией при применении БПЛА для задач подобных типов.

Несомненно, вероятность выполнения задачи беспилотным комплексом в большей мере зависит от его приборного оснащения.

Наличие полноценной системы автоматического управления – этим, по существу, и отличается беспилотный летательный аппарат от дистанционно управляемой модели [2].

В условиях наличия существенных ограничений и неопределенностей входной информации система управления БПЛА представляет значительную трудность формализации задач синтеза регуляторов БПЛА.

В связи с этим целесообразным является применение регуляторов, основанных на нечеткой логике.

Для реализации нечеткого регулятора необходимо определить входные и выходные лингвистические переменные, а также базу правил образования результирующей переменной.

Основная часть. Рассмотрим уравнения продольного движения летательного аппарата с рулевым аэродинамическим управлением. Будем полагать, что управление производится

в декартовой системе координат и летательный аппарат стабилизирован по крену [3].

При рассмотрении процессов движения самолета и вертолета широко использовались уравнения в малых отклонениях. При таком рассмотрении процесс линеаризации проводился применительно к некоторой опорной траектории, которая соответствует невозмущенному движению летательного аппарата.

Для многих режимов полета летательного аппарата такой способ описания движения не является эффективным. Это связано с трудностями выделения (назначения) невозмущенного движения и тем, что отклонения не являются малыми. Вышеназванные трудности возможно преодолеть, используя способ линеаризации исходных уравнений лишь относительно тех координат, для которых действительно имеют место зависимости, близкие к линейным в рабочем диапазоне их изменения.

Применим такой метод линеаризации к уравнениям продольного движения летательного аппарата:

$$\begin{aligned} mV\dot{\theta} &= Y_n + P\sin\alpha - mg\cos\theta; \\ m\dot{V} &= -X_a + P\cos\alpha - mg\sin\theta; \\ I_z\ddot{\vartheta} + m_z^w z w_z + m_z^a a &= m_z^e \varepsilon; \\ \vartheta &= \theta + a. \end{aligned} \tag{1}$$

Если участок траектории летательного аппарата имеет постоянный наклон или горизонтален, то в системе управления может быть выработано или программно введено управляющее воздействие, которое компенсирует составляющую силы веса подъемной силой. В этом случае уравнение движения центра масс представляется интегрирующим звеном.

Преобразуем уравнение угловых движений (1) к такому виду, чтобы оно позволяло

найти угол атаки. Используя уравнение связи углов и привлекая уравнение движения центра масс, найдем первую и вторую производные угла тангажа:

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \dot{\theta} + \dot{\alpha} = \frac{1}{T_\theta} \alpha - \frac{g}{V} \cos \theta + \dot{\alpha}; \\ \ddot{\theta} &= \ddot{\theta} + \ddot{\alpha} = \frac{1}{T_\theta} \dot{\alpha} - \frac{\dot{T}_\theta}{T_\theta^2} \alpha - \\ &\quad - \frac{d}{dt} \left(\frac{g}{V} \cos \theta \right) + \ddot{\alpha}.\end{aligned}\quad (2)$$

Подставим эти выражения в уравнения угловых движений и получим:

$$\begin{aligned}I_z \ddot{\alpha} + \left(m_z^\omega z + \frac{I_z}{T_\theta} \right) \dot{\alpha} + \\ + \left(m_z^\delta + \frac{m_z^\omega z}{T_\theta} - I_z \frac{\dot{T}_\theta}{T_\theta^2} \right) \alpha = \\ = m_z^\delta \delta + m_z^\omega z \frac{g}{V} \cos \theta + I_z \frac{d}{dt} \frac{g}{V} \cos \theta.\end{aligned}\quad (3)$$

Используя операторную форму записи, преобразуем к следующему виду:

$$(D^2 + 2\zeta_\alpha \omega_\alpha D + \omega_\alpha^2) \alpha = k_\delta \delta + f_g, \quad (4)$$

где

$$\omega_\alpha^2 = \frac{m_z^\alpha}{I_z} + \frac{m_z^\omega z}{I_z T_\theta} - \frac{\dot{T}_\theta}{T_\theta^2};$$

$$2\zeta_\alpha \omega_\alpha = \frac{m_z^\delta}{I_z} + \frac{1}{T_\theta};$$

$$k_\delta = \frac{m_z^\delta}{I_z};$$

$$f_g = \left(\frac{m_z^\omega z}{I_z} + D \right) \frac{g}{V} \cos \theta.$$

После подстановки численных значений была получена следующая передаточная функция:

$$W(p) = \frac{y}{u} = \frac{1,8p + 1}{10,2p^2 + 12p + 1}. \quad (5)$$

Из выражения (5) видно, что связь между отклонением руля и углом тангажа, как и у короткопериодического движения самолета в продольном канале, выражается передаточной функцией колебательного звена. Коэффициенты этой

передаточной функции зависят от высоты, скорости, массы и моментов инерции летательного аппарата и других величин, изменяющихся в полете.

В теории управления большое внимание уделяется синтезу систем управления при недостаточной информации об объекте управления и действующих на него полезных сигналах, и помех. Один из методов решения этой проблемы – использование нечетких методов управления. В качестве корректирующих устройств систем автоматического управления (САУ) получили широкое распространение пропорционально-интегральные (ПИ) регуляторы.

Была поставлена задача снижения времени переходного процесса. В качестве базовой структуры, формирующей сигнал управления для САУ, выбран ПИ-регулятор, изменение коэффициентов которого происходит в зависимости от данных, получаемых с нечеткого контроллера. Сигнал, подаваемый на силовую часть цепи, состоит из пропорциональной и интегральной частей. Причем каждая из этих частей регулируется с помощью нечеткой логики в зависимости от двух входных переменных нечеткого блока.

Отличие ПИ-регулятора с контроллером, основанным на нечеткой логике, от обычного заключается в том, что коэффициенты усиления в пропорциональной и интегрирующей цепях регулятора не являются статическими, т. е. зависят от состояния системы в текущий момент времени. Это позволяет качественно изменить процесс управления, учесть параметры сигналов в системе (скорость изменения сигнала, ускорение), а также сделать процесс управления более адаптивным.

Структура и принцип работы контроллера, основанного на нечеткой логике. В современных системах применяют контроллеры, основанные на нечеткой логике [4]. Рассмотрим принцип работы контроллера.

1. На вход контроллера поступает необходимое для решения конкретной задачи число входных сигналов (в настоящем проекте два), образующих входной четкий вектор X .

2. Происходит процедура фазификации, т. е. исходя из текущего значения четкого сигнала, на основании известных функций принадлежности каждому сигналу четкого вектора присваивается определенное входное значение (терм), образуя входной нечеткий вектор. Сигналы, входящие в этот вектор, называются лингвистическими переменными.

3. Программа нечеткого логического вывода (FIS-структура) на основании нечеткой базы знаний ставит в соответствие каждому вектору выходной нечеткий вектор, являющийся результатом нечеткого логического вывода.

4. Значениям (термам) лингвистических переменных, составляющих выходной вектор, на основании функций принадлежности ставятся в соответствие определенные четкие значения сигналов, образующие выходной четкий вектор Y , т. е. происходит процедура дефазификации.

5. Сигналы, формирующие вектор Y , поступают в схему регулятора для реализации процесса управления.

Следовательно, первой задачей является определение лингвистических переменных, составление их терм-множеств и функций принадлежности, определение логических переменных контроллера и их функций принадлежности. Как было отмечено ранее, входными сигналами для контроллера, основанного на нечеткой логике, являются пропорциональная составляющая P и интегральная составляющая I . Применительно к контроллеру эти сигналы – лингвистические переменные. Для данных переменных вводятся следующие термы. Для P , I и выходной лингвистических переменных:

- отрицательное большое (NL);
- отрицательное среднее (NM);
- отрицательное, близкое к нулю (N);
- нулевое (Z);
- положительное, близкое к нулю (P);
- положительное среднее (PM);
- положительное большое (PL).

Для реализации процедур фазификации и дефазификации задаются функции принадлежности для каждой входной и выходной переменных (рис. 1–3).

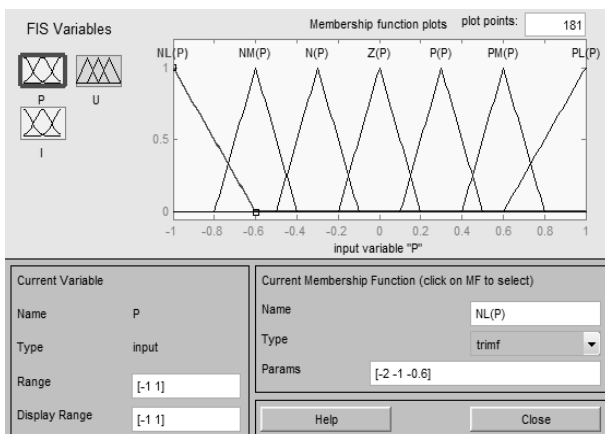


Рис. 1. Функция принадлежности для терм-множества лингвистической переменной P

При формировании нечеткой базы знаний контроллера также выполняются эксперименты в целях корректировки функций принадлежности лингвистических переменных. В контроллере база знаний задается непосредственно совокуп-

ностью правил «если – то» с помощью стандартных функций языков программирования.

Исследуя нечеткую базу знаний контроллера и функции принадлежности лингвистических переменных, нетрудно заметить, что в контроллере реализуется идея подачи сигнала с регулятора, несколько опережающего происходящие в системе процессы. Так, при запуске системы коэффициент усиления в пропорциональной цепи повышается, уменьшая время переходного процесса, а при приближении сигнала к требуемому значению резко снижается, уменьшая перерегулирование в системе.

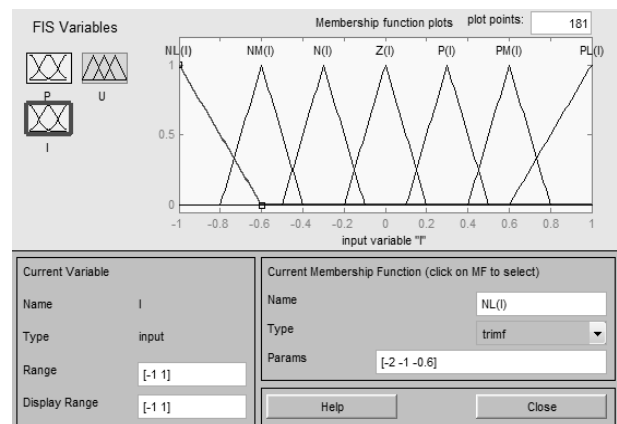


Рис. 2. Функция принадлежности для терм-множества лингвистической переменной I

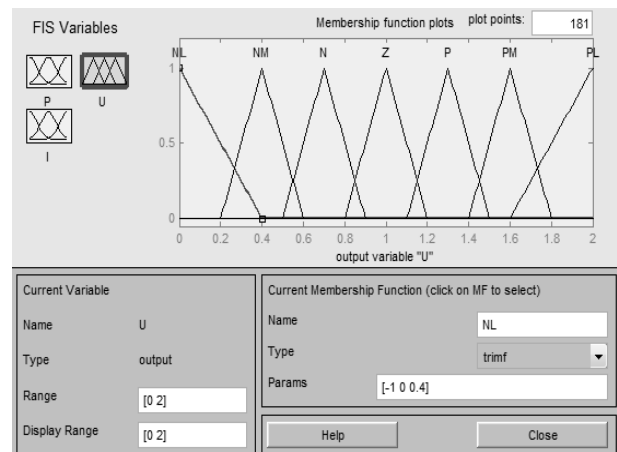


Рис. 3. Функция принадлежности для терм-множества лингвистической выходной переменной

База правил имеет следующий вид:

1. If (P is NL) and (I is NL) then (U is NL).
2. If (P is NL) and (I is NM) then (U is NL).
3. If (P is NL) and (I is N) then (U is NM).
4. If (P is NL) and (I is Z) then (U is NM).
5. If (P is NL) and (I is P) then (U is Z).
6. If (P is NL) and (I is PM) then (U is Z).
7. If (P is NL) and (I is PL) then (U is Z).

8. If (P is NM) and (I is NL) then (U is NL).
9. If (P is NM) and (I is NM) then (U is NL).
10. If (P is NM) and (I is N) then (U is NM).
11. If (P is NM) and (I is Z) then (U is NM).
12. If (P is NM) and (I is P) then (U is Z).
13. If (P is NM) and (I is PM) then (U is Z).
14. If (P is NM) and (I is PL) then (U is Z).
15. If (P is N) and (I is NL) then (U is NM).
16. If (P is N) and (I is NM) then (U is NM).
17. If (P is N) and (I is N) then (U is Z).
18. If (P is N) and (I is P) then (U is Z).
19. If (P is N) and (I is PM) then (U is PM).
20. If (P is N) and (I is PL) then (U is PM).
21. If (P is Z) and (I is NL) then (U is NM).
22. If (P is Z) and (I is N) then (U is Z).
23. If (P is Z) and (I is Z) then (U is Z).
24. If (P is Z) and (I is P) then (U is PM).
25. If (P is Z) and (I is PM) then (U is PM).
26. If (P is Z) and (I is PL) then (U is PM).
27. If (P is P) and (I is NL) then (U is Z).
28. If (P is P) and (I is NM) then (U is Z).
29. If (P is P) and (I is N) then (U is PM).
30. If (P is P) and (I is Z) then (U is PM).
31. If (P is P) and (I is P) then (U is PL).
32. If (P is P) and (I is PM) then (U is PL).
33. If (P is P) and (I is PL) then (U is PL).
34. If (P is PM) and (I is NL) then (U is Z).
35. If (P is PM) and (I is NM) then (U is Z).
36. If (P is PM) and (I is N) then (U is PM).
37. If (P is PM) and (I is Z) then (U is PM).
38. If (P is PM) and (I is P) then (U is PL).
39. If (P is PM) and (I is PL) then (U is PL).
40. If (P is PL) and (I is NL) then (U is Z).
41. If (P is PL) and (I is NM) then (U is Z).
42. If (P is PL) and (I is N) then (U is PM).
43. If (P is PL) and (I is P) then (U is PL).
44. If (P is PL) and (I is PM) then (U is PL).
45. If (P is PL) and (I is PL) then (U is PL).

39. If (P is PM) and (I is Z) then (U is PM).
40. If (P is PM) and (I is P) then (U is PL).
41. If (P is PM) and (I is PM) then (U is PL).
42. If (P is PM) and (I is PL) then (U is PL).
43. If (P is PL) and (I is NL) then (U is Z).
44. If (P is PL) and (I is NM) then (U is Z).
45. If (P is PL) and (I is N) then (U is PM).
46. If (P is PL) and (I is Z) then (U is PM).
47. If (P is PL) and (I is P) then (U is PL).
48. If (P is PL) and (I is PM) then (U is PL).
49. If (P is PL) and (I is PL) then (U is PL).

Составление программы нечеткого логического вывода. Программа нечеткого логического вывода представляет собой алгоритм получения нечетких логических заключений, выражающихся в значениях выходных лингвистических переменных. Процедура нечеткого логического вывода происходит на основе нечеткой базы знаний с использованием функций принадлежности лингвистических переменных.

Структуры систем с ПИ-регулятором и ПИ-подобным регулятором, основанном на нечеткой логике, имеют вид, показанный на рис. 4 и 5.

Время переходного процесса – 30 с, перерегулирование – 0%, статическая ошибка – 0%.

Как видно из графика переходного процесса (рис. 6), система с переменными, такими как постоянная времени объекта и коэффициент усиления, и применением нечеткого регулятора является устойчивой.

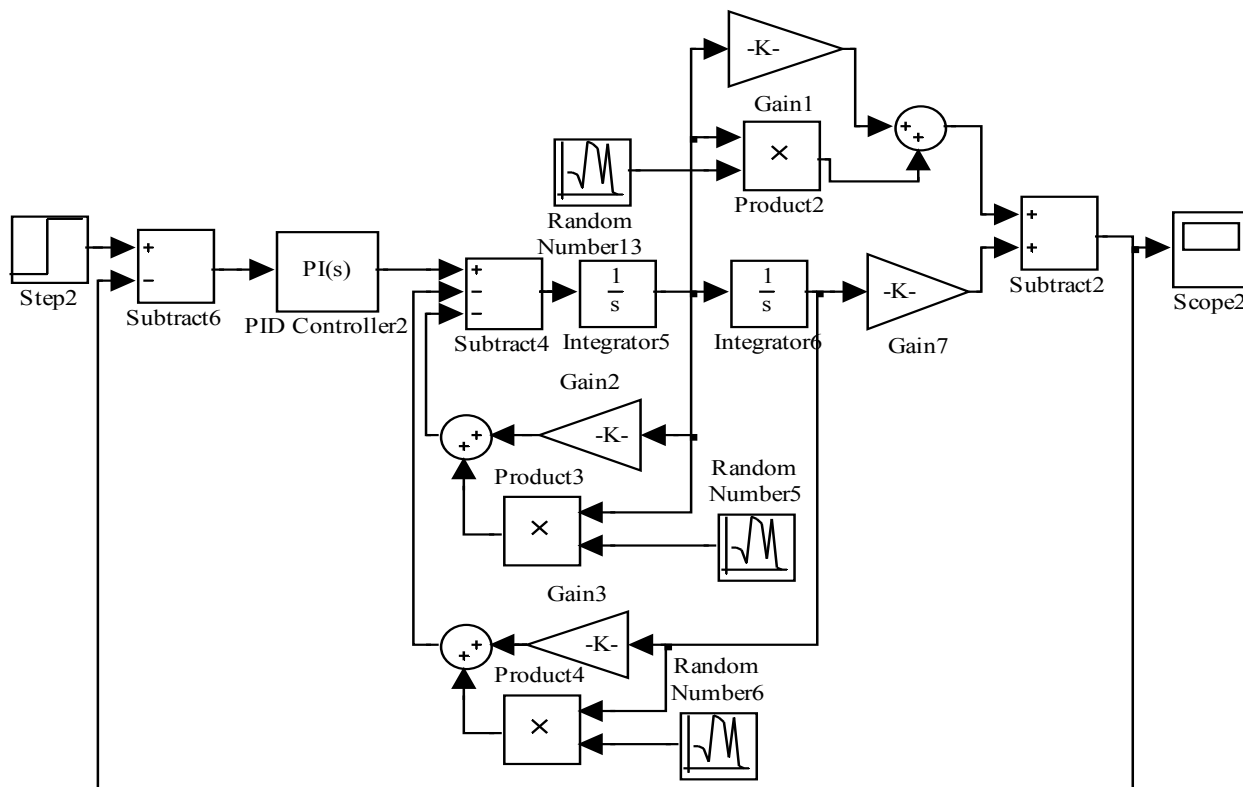


Рис. 4. Структурная схема системы управления с ПИ-регулятором

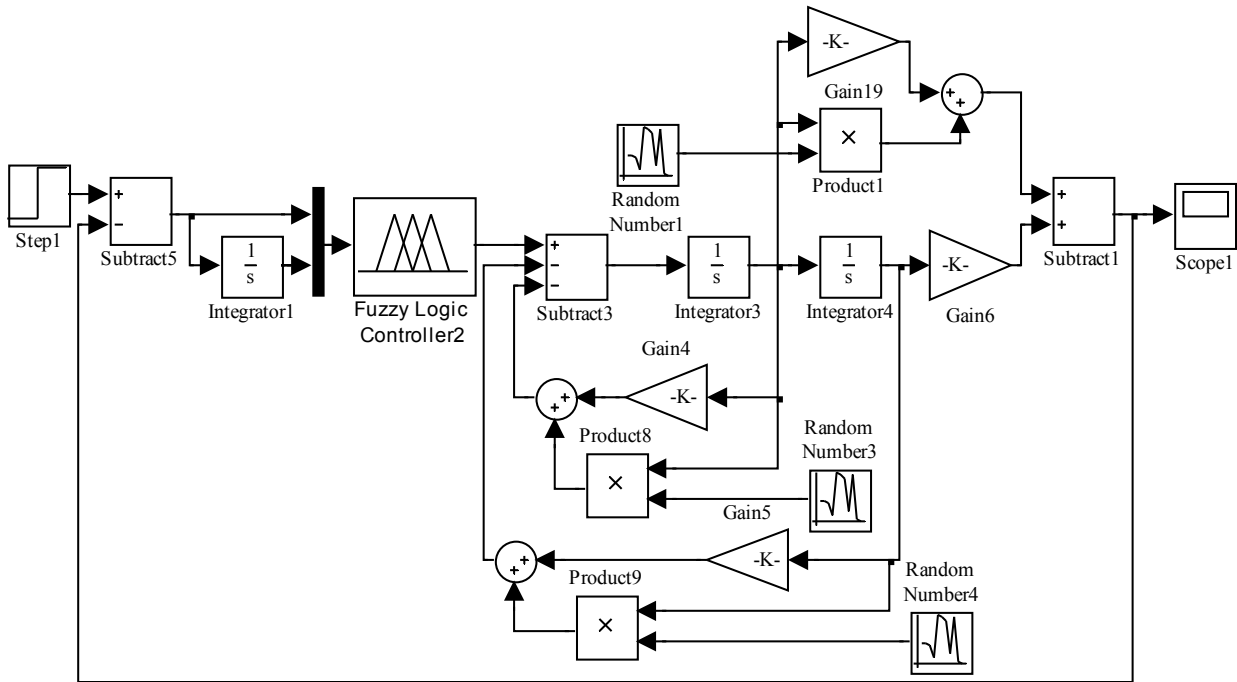


Рис. 5. Структурная схема системы управления ПИ-подобного регулятора, основанного на нечеткой логике с переменными коэффициентами

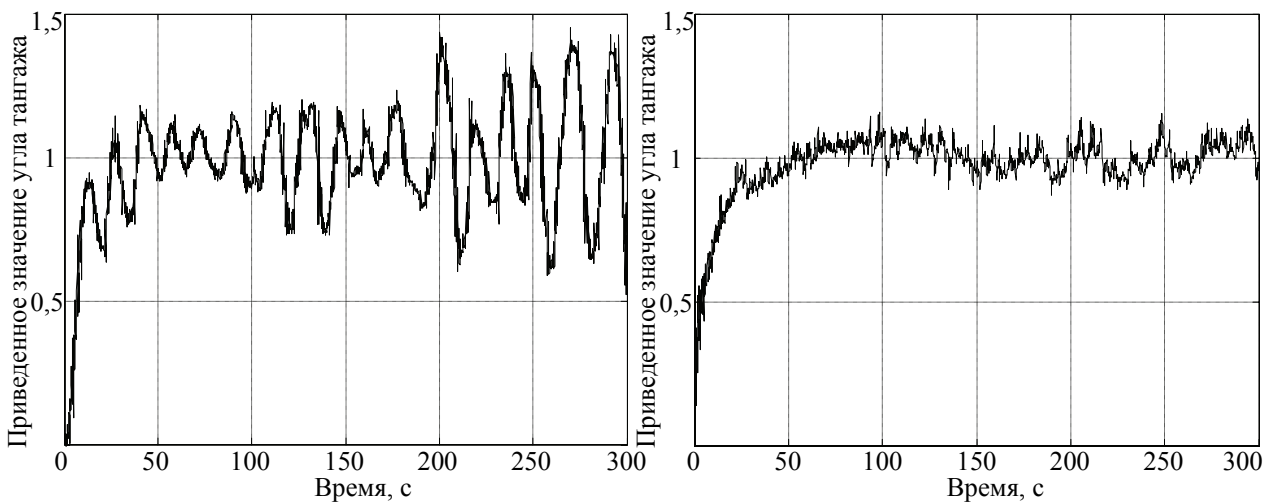


Рис. 6. Переходный процесс системы с ПИ-регулятором (а) и переходный процесс с ПИ-подобным нечетким регулятором и переменными коэффициентами (б)

Заключение. Таким образом, динамика САУ с нечетким контроллером всецело определяется архитектурой системы нечеткого вывода: методом построения и содержанием базы продукционных правил, а также способом реа-

лизации алгоритма нечеткого вывода. Поэтому при проектировании рассмотренного типа САУ с особой тщательностью необходимо подходить к выбору экспертов, методикам экспертного опроса и формированию базы правил.

Литература

1. Особенности классификации БПЛА самолетного типа / Н. С. Сенюшкин [и др.] // Молодой ученый. 2010. Т. 1, № 11. С. 65–68.
2. Беспилотные летательные аппараты / С. В. Ганин [и др.]. СПб.: Невский бастион, 1999. 160 с.
3. Красовский А. А., Вавилов Ю. А., Сучков А. И. Системы автоматического управления летательным аппаратом. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1971. 478 с.
4. Кудинов Ю. И. Нечеткие системы управления // Известия Академии наук. Техническая кибернетика. 1990. № 5. С. 196–206.

References

1. Senyushkin N. S., Yamal R. R., Usov D. V., Muraeva M. A. Features of the classification of UAV aircraft of the type. *Molodoy uchenyy* [The young scientist], 2010, vol. 1, no. 11, pp. 65–68 (In Russian).
2. Ganin S. V., Karpenko A. V., Kolnogorov V. V., Petrov G. F. *Bespilotnyye letatel'nyye apparaty* [Unmanned aerial vehicles]. St. Petersburg, Nevskiy bastion Publ., 1999. 160 p.
3. Krasovskiy A. A., Vavilov Yu. A., Suchkov A. I. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya letatel'nyy apparatom* [Automatic control system of the aircraft]. Moscow, Izdatel'stvo VVIA imeni professora N. E. Zhukovskogo Publ., 1971. 478 p.
4. Kudinov Ya. I. Fuzzy control systems. *Izvestiya Akademii nauk. Tekhnicheskaya kibernetika* [Proceedings of the Academy of Sciences. Technical Cybernetics], 1990, no. 5, pp. 196–206 (In Russian).

Информация об авторах

Карпович Дмитрий Семенович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: karpovich@tut.by

Шумский Андрей Николаевич – аспирант кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: andreishumski91@gmail.com

Сарока Виктор Викторович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: viksar@mail.ru

Information about the authors

Karpovich Dmitriy Semenovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karpovich@tut.by

Shumski Andrei Nikolaevich – PhD student, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andreishumski91@gmail.com

Saroka Viktor Viktorovich – PhD (Engineering), Senior 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: viksar@mail.ru

Поступила 07.03.2016