

УДК 004.8:681.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ С НЕЧЕТКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

**Макаров И.М.**, Лохин В.М. д.т.н., профессор, Романов М.П. д.т.н., профессор,  
Ситников М.С., к.т.н., МГТУ МИРЭА, Москва, Россия, E-mail: cpd@mirea.ru

**Аннотация** В статье решается задача детального анализа характера нелинейных преобразований, реализуемых в нечетких регуляторах, дается развитие метода гармонического баланса для исследования периодических колебаний в интеллектуальных системах автоматического управления, основанных на технологии нечеткой логики

**Ключевые слова:** регуляторы на базе нечеткой логики, нелинейные преобразования в нечетких регуляторах, исследование периодических колебаний, интеллектуальные системы автоматического управления

## RESEARCH OF PERIODIC FLUCTUATIONS IN CONTROL SYSTEMS WITH FUZZY REGULATORS

**Makarov I.M.**, Lokhin V.M., Dr.Sci., proff., Romanov M.P., Dr.Sci., proff.,  
Sitnikov M.S., PhD., MSTU MIREA, Moscow, Russia, E-mail: cpd@mirea.ru

**Summary** In article the problem of the detailed analysis of the nonlinear transformations in fuzzy regulators is solved. Development of a method of harmonious balance for research of periodic fluctuations in the intelligent systems of automatic control on the base of fuzzy logic technology is given

**Keywords:** regulators on the basis of fuzzy logic, nonlinear transformations in fuzzy regulators, research of periodic fluctuations, intelligent systems of automatic control

### Введение

По мере совершенствования различных образцов техники, как гражданского, так и военного назначения, все более возрастают требования к системам управления на различных уровнях иерархии управления, включая исполнительный.

Следует подчеркнуть, что для многих образцов перспективной техники, где требуется высокая скорость и точность перемещений (следящие приводы, системы наведения, изделия микросистемной техники и др.), традиционные технологии уже не могут обеспечить повышение качества управления, особенно в условиях воздействия различных факторов неопределенности, действующих на систему. К таким факторам неопределенности относится, например, изменение кинематических связей при изменении конфигурации различного рода многозвенных электромеханических устройств, температурные изменения коэффициентов вязкого трения, изменение величины люф-

та и зазора в передаточных элементах привода, несоответствие динамических характеристик силовых ключей требуемому частотному диапазону, различного рода возмущения, приведенные как к валу исполнительного двигателя, так и к его входу и др.

Применение интеллектуальных технологий управления как показывают зарубежные [1] и отечественные исследования, в том числе теоретические и экспериментальные исследования авторов [2-4], может обеспечить существенное повышение быстродействия и других показателей процесса управления, инвариантности к воздействию возмущающих факторов, улучшение энергетических показателей системы и т.д. Применительно к такому классу объектов и задач достаточно использовать интеллектуальные в малом системы управления [3]. При этом формирование алгоритма управления может осуществляться интеллектуальным регулятором (ИР), который включается вместо традиционного последовательно с объектом в контур системы (регулятор последовательного действия).

Естественно, возникает вопрос о влиянии такого регулятора на динамику системы. Следует подчеркнуть, что хотя "бум нечеткости" начался в 80-х годах прошлого столетия, более или менее успешно работающие методы проверки устойчивости нечетких систем были получены к концу прошлого десятилетия [1], причем некоторые из них были позаимствованы из классической теории управления и доработаны.

В данной статье ставится задача детального анализа характера нелинейных преобразований, осуществляемых ИР в случае, когда в качестве базовой технологии для его построения используется технология нечеткой логики, и на основе проведенного анализа дается развитие метода гармонического баланса для исследования периодических колебаний в рассматриваемом классе интеллектуальных САУ (ИСАУ).

Необходимо отметить, что технология нечеткой логики находит в последние годы все более широкое практическое применение. Методы нечеткого логического вывода позволяют обеспечить параллельную интерпретацию знаний с помощью специализированных аппаратных средств, обладающих высоким быстродействием, что делает нечеткую логику исключительно перспективной для создания интеллектуальных нечетких регуляторов (НР) последовательного типа. Такие регуляторы, ориентированные на обработку логико-лингвистических моделей представления знаний, предназначенных для формализации неточных, размытых в смысловом отношении суждений, осуществляют классификацию входных данных на уровне нечетких множеств и могут использоваться в быстродействующих системах, функционирующих в условиях неполноты информации.

## 1. Нелинейные преобразования в нечетких регуляторах

Развитие общих подходов к решению задач исследования динамики ИСАУ, разработки и настройки интеллектуальных регуляторов предполагает необходимость детального понимания особенностей тех преобразований, которые выполняются при обработке имеющихся в системе знаний.

Известно и практически очевидно, что при всех различиях используемых способов и технологий обработки знаний, преобразования, реализуемые в интеллектуальных регуляторах, носят нелинейный характер. Однако, важнейшим вопросом остается выявление ключевых факторов, определяющих собственно вид соответствующей нелинейной зависимости между сигналами на входе и выходе интеллектуального регулятора, построенного на основе той или иной технологии обработки знаний. С этой точки зрения можно говорить о двух различных аспектах анализа и синтеза интеллектуальных регуляторов:

- выявление характера нелинейных преобразований в интеллектуальном регуляторе при известных параметрах его настройки;
- обеспечение требуемого характера нелинейных преобразований в интеллектуальном регуляторе за счет выбора параметров его настройки.

Рассмотрим особенности нелинейных преобразований в интеллектуальных регуляторах, построенных на основе технологии нечеткой логики и приобретающих все большее распространение и популярность.

Учитывая последнее обстоятельство, общеизвестные положения, связанные с моделями нечеткого логического вывода, авторы считают возможным опустить и отметить, что проведен анализ наиболее распространенных схем построения логико-лингвистических моделей и организации их последующей обработки: Мамдани, Ларсена, Цукамото и Сугэно и основные итоги этого анализа, связанные с исследованием принципов построения и специфики нечетких систем различных типов, с одной стороны, и осмыслением опыта их практического применения в задачах управления, с другой, приводят к целому ряду принципиально важных обобщений:

- использование средств и методов, принятых в нечеткой логике для представления и обработки знаний, обеспечивает простоту формирования, понимания, отладки и модификации создаваемых моделей управления;
- реализуемые в нечетких регуляторах преобразования, при всех различиях принятых способов представления и методов обработки знаний, являются нелинейными по своей сути;

- характер нелинейных преобразований, реализуемых в нечетком регуляторе того или иного типа, существенным образом зависит от параметров его настройки, включая число входных и выходных термов, а также форму и относительное размещения функций принадлежности;

- модель Сугэно является эффективным средством для описания систем с априорно-известным или предполагаемым характером нелинейных преобразований между входными и выходными сигналами;

- модели Мамдани, Ларсена и Цукамото являются эффективным средством для формирования нелинейных преобразований между входными и выходными сигналами системы на основе описания желаемых законов ее функционирования в виде правил поведения во всем диапазоне возможных ситуаций; при этом возможности модели Цукамото по формированию нелинейных преобразований во многом ограничиваются необходимостью использования монотонных функций принадлежности для описания выходных термов.

Достаточно подробно вопрос анализа нелинейных преобразований рассмотрен в работе [5].

Некоторые примеры нелинейных преобразований при использовании модели Мамдани приведены в таблице 1.

Как видим, даже предварительный анализ представленных нелинейностей (в первую очередь это п.п. 1.1-1.4 из таблицы 1) объясняет принципиальную возможность повышения качества переходных процессов в системах НР по сравнению с ПИД-регулятором.

Вместе с тем известно, что введение нелинейностей в контур САУ приводит к различного рода проблемам, связанным в динамикой системы и, в частности, с возможностью появления устойчивых периодических колебаний.

Таблица 1

Примеры нелинейных преобразований при использовании модели Мамдани

	Вход	Выход	Нелинейное преобразование
1.1			
1.2			
1.3			
1.4			
1.5			
1.6			

## 2. Исследование периодических колебаний методом гармонического баланса

Структурная схема интеллектуальной системы автоматического управления с нечетким регулятором (НР) представлена в виде последовательного соединения нечеткого вычислителя (НВ), имеющего  $h$  – входов с подключенными к ним линейными динамическими звеньями, и объекта управления (ОУ) с передаточной функцией  $W_{\text{Oy}}(s)$  (рис.1), где  $g(t)$  — сигнал задающего воздействия,  $u(t)$  — сигнал управления,  $y(t)$  — выходной сигнал,  $e(t)$  — сигнал ошибки управления,  $s$  — оператор Лапласа.

Нечеткий регулятор может строиться на основе двух видов структур: первого вида - нечеткий регулятор с параллельными одномерными нечеткими вычислителями  $\text{НВ}_i$  и второго вида – с нечетким вычислителем с многомерным входом (на рис. 2 и 3 приведены для примера структурные схемы нечетких ПИД-регуляторов первого и второго вида).

Для исследования периодических колебаний в ИСАУ с нечетким регулятором (рис.1) на основе метода гармонического баланса будем рассматривать нечеткий регулятор как нелинейный частотно-зависимый элемент с одним входом и одним выходом.

Для построения на комплексной плоскости характеристики эквивалентного комплексного коэффициента усиления нечеткого регулятора (ЭК КУ НР) создан программный модуль в среде MatLab Simulink, структурная схема которого изображена на рис. 4. В массив данных записываются значения действительной и мнимой части ЭККУ НР для фиксированной частоты и различных значений амплитуды, затем производится расчет действительной и мнимой частей инверсного комплексного коэффициента - ИККУ НР и отображение их на комплексной плоскости.

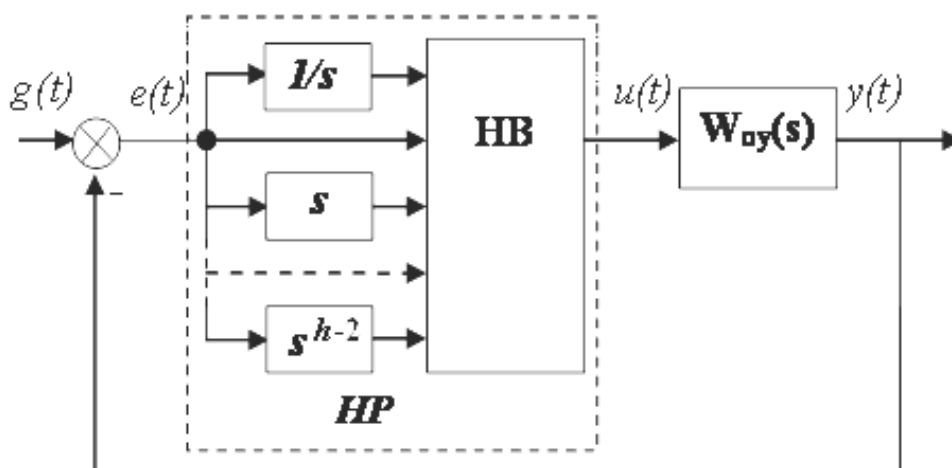


Рис. 1. Обобщенная структурная схема ИСАУ с нечетким регулятором

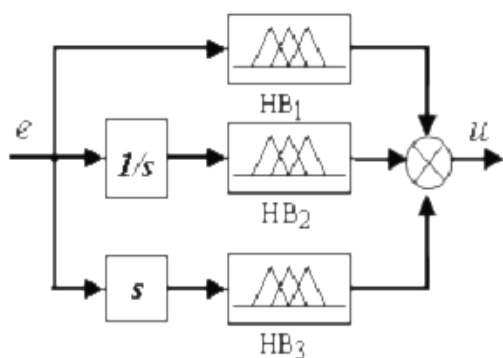


Рис. 2. Нечеткий ПИД-регулятор первого вида

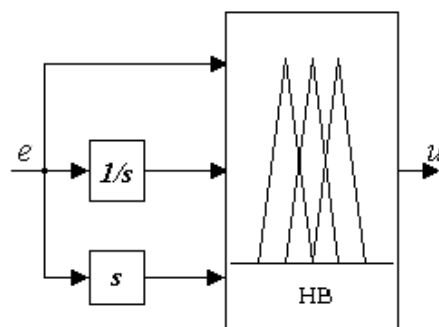


Рис. 3. Нечеткий ПИД-регулятор второго вида

В результате расчета в среде MatLab Simulink на комплексную плоскость выводятся семейство кривых ИККУ -  $J^l(A, \omega)$  и годограф объекта управления  $W_{oy}(j\omega)$ . Точка, принадлежащая и инверсному комплексному коэффициенту НР и годографу объекта управления, является решением уравнения гармбаланса при условии равенства частот на пересекающихся графиках ( $\omega_{oy} = \omega_{НР}$ ). Амплитуда колебаний определяется в точке пересечения по кривой  $-J^{-1}(A, \omega_{НР})$  при частоте  $\omega_{oy} = \omega_{НР}$ .

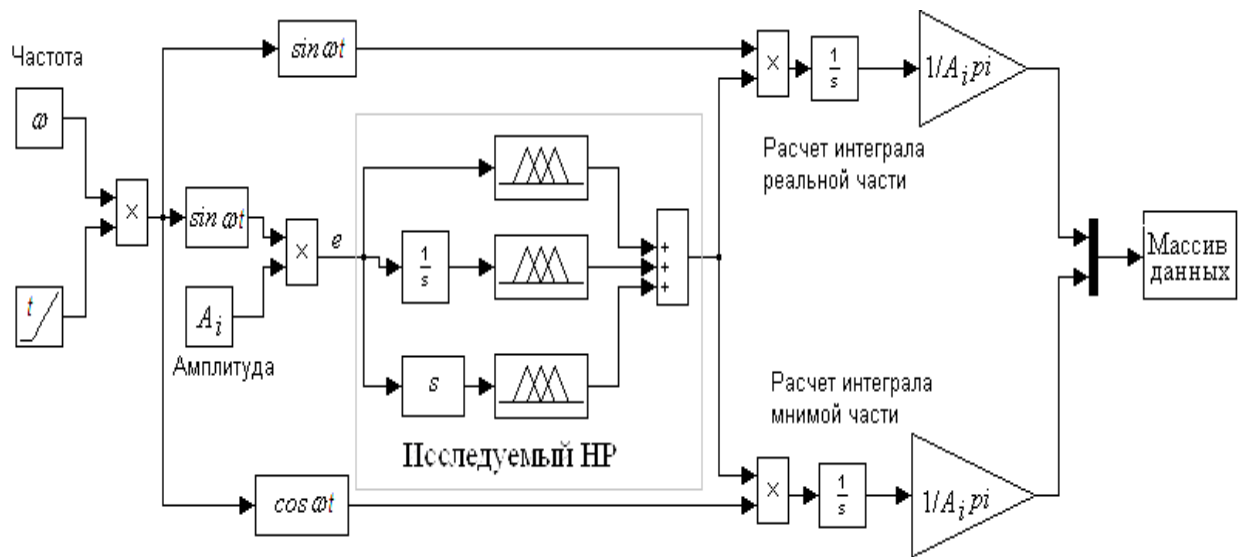
Таким образом, задача исследования периодических колебаний в ИСАУ с нечетким регулятором сводится к известной, широко распространенной в инженерной практике, методике графоаналитического расчета колебаний в нелинейной САУ.

Рассмотрим конкретные примеры исследования ИСАУ с нечеткими регуляторами, соответствующие схеме на рис. 1.

**Пример 1.** Тип регулятора: нечеткий ПИД первого вида, Модель НВ по Мамдани.

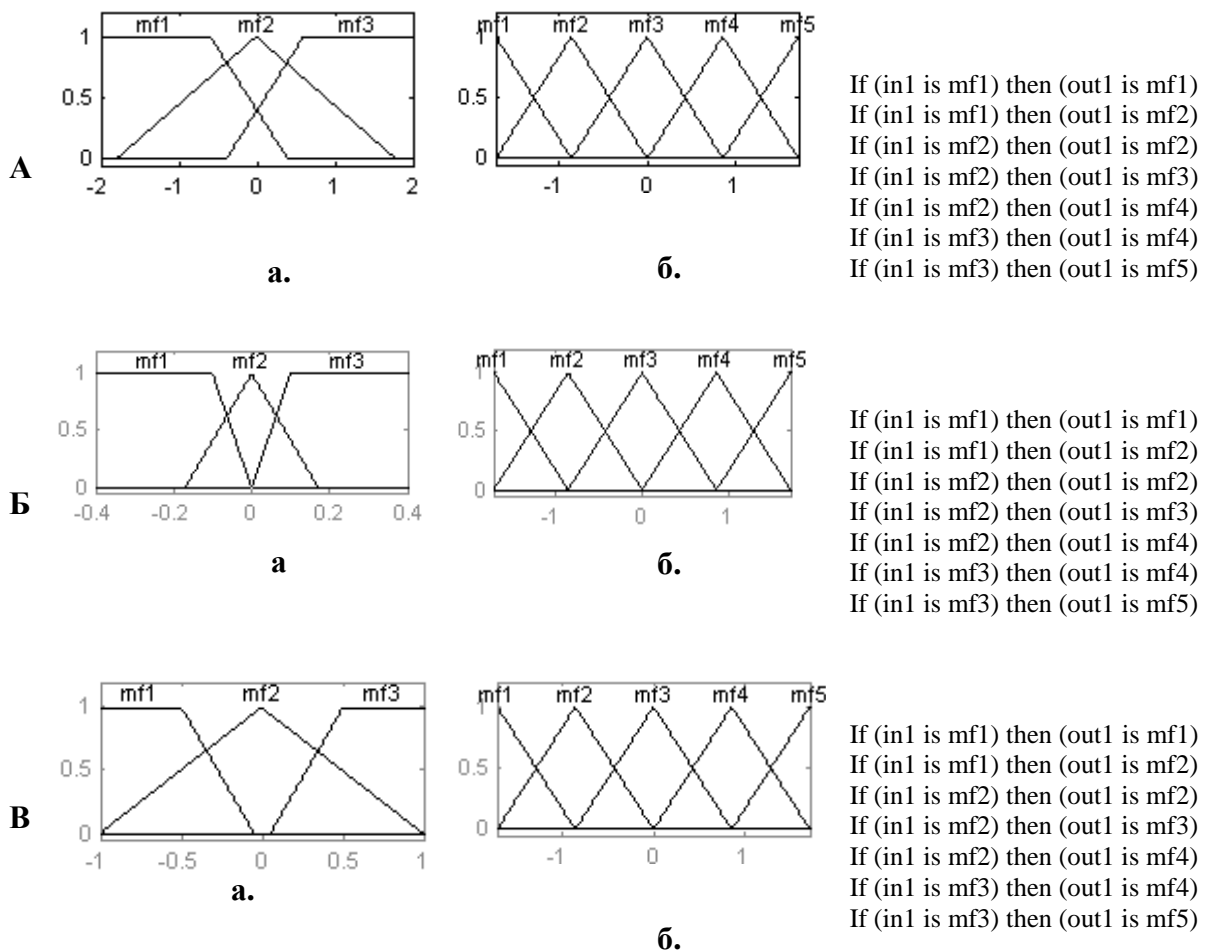
$$W_{oy}(s) = \frac{K_{oy}}{s(0.1s + 1)(0.4s + 1)(0.6s + 1)}, \quad K_{oy}=4$$

Функции принадлежности входной (а) и выходной лингвистических переменных НВ (б) и база продукционных правил (в) в интегральном, дифференциальном и пропорциональном каналах представлены соответственно на рис. 5 А, Б, В, а нелинейные преобразования на рис.6 а, б, в.



**Рис. 4.** Программный модуль в среде MatLab Simulink для вычисления действительной и мнимой частей ЭККУ НР

При указанных параметрах системы решение уравнения гармонического баланса представлено на рис.7а.



**Рис.5**



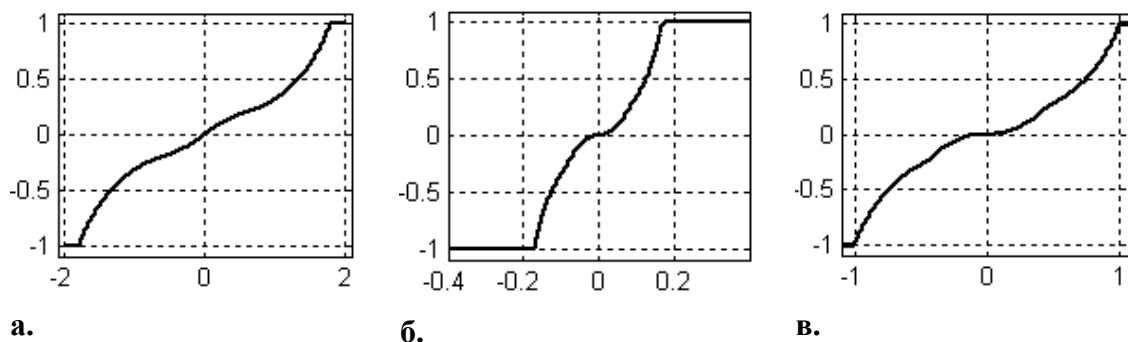


Рис.6

Как видно из рис.7а в исследуемой системе существуют периодические колебания с частотой  $\omega \approx 3$  рад/с и амплитудой  $A=0,66$ . На рис.7б представлены результаты прямого моделирования, которые с достаточной точностью совпадают с результатами расчета.

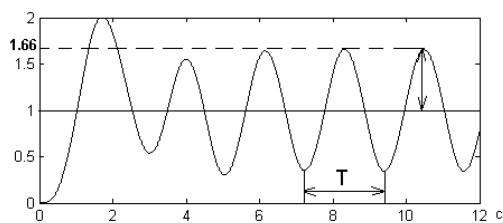


Рис. 7а.

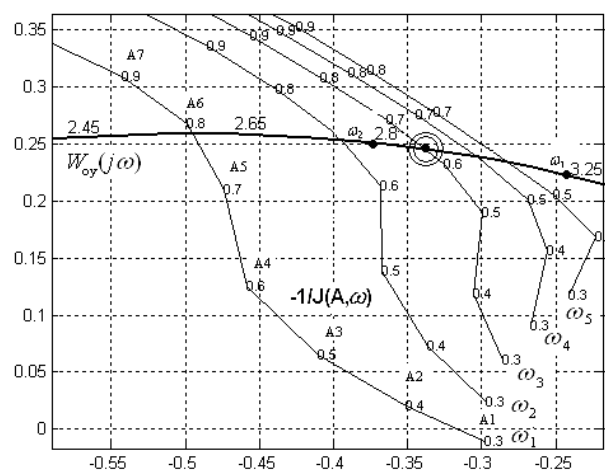


Рис. 7б.

На рис.8 приведены результаты исследования той же системы при уменьшении коэффициента усиления в 8 раз,  $K_{oy}=0,5$ .

Как видно, характеристики  $-J^{-1}(A,\omega)$  и  $W_{oy}(j\omega)$  не пересекаются (рис.8б), следовательно, колебаний в системе нет; эти расчеты подтверждает переходной процесс в системе (рис.8а).

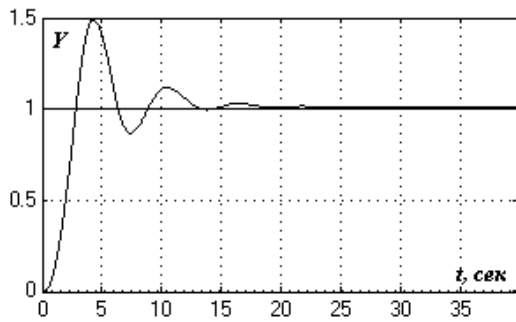


Рис. 8а.

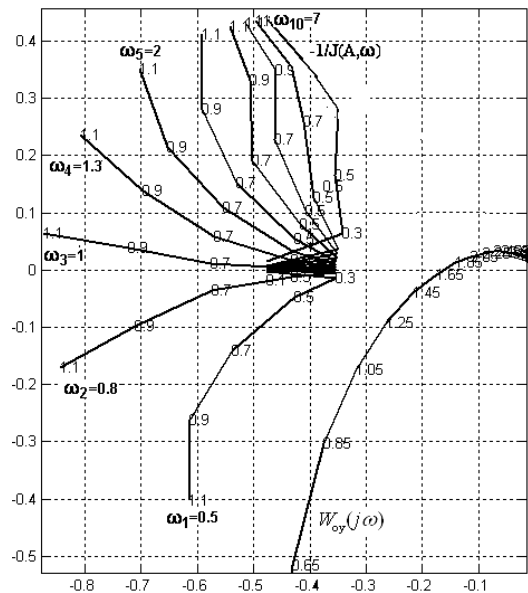
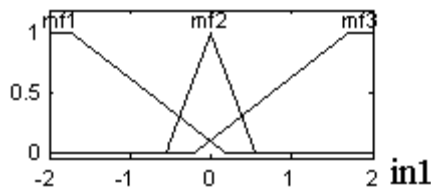


Рис.8б.

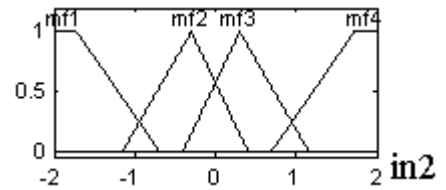
**Пример 2.** Тип регулятора - нечеткий ПИД второго вида. Модель НВ - Мамдани.

$$W_{oy}(s) = \frac{K_{oy}}{s(0.1s + 1)(0.4s + 1)(0.6s + 1)}, \quad K_{oy}=0,8.$$

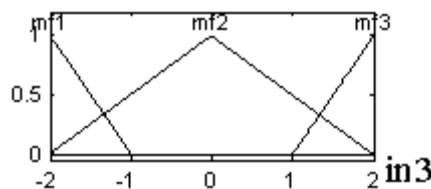
Функции принадлежности входных лингвистических переменных для пропорционального, интегрального и дифференциального каналов, а также для выходной переменной представлены на рис.9 (а-г), а нелинейные преобразования на рис.10.



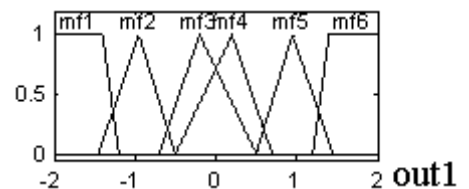
а.



б.



в.



г.

Рис. 9

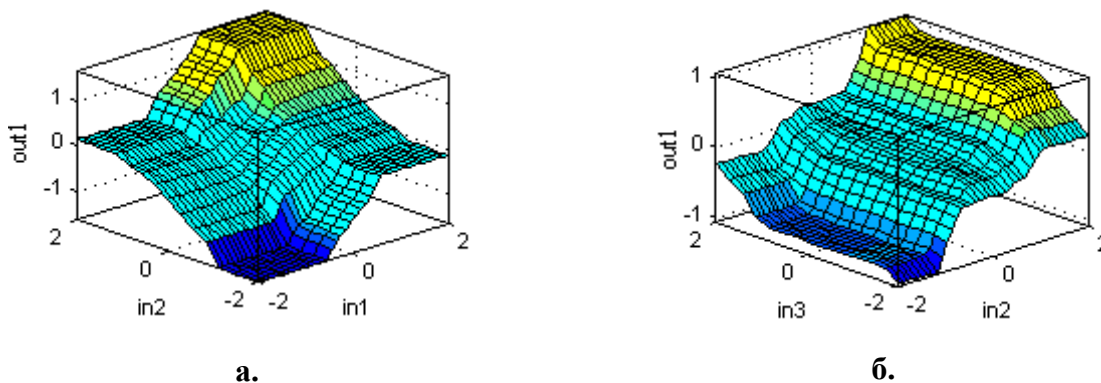


Рис.10

База продукционных правил имеет вид:

- If (in1 is mf1) and (in2 is mf1) and (in3 is mf1) then (out1 is mf1)
- If (in1 is mf1) and (in2 is mf1) and (in3 is mf2) then (out1 is mf1)
- If (in1 is mf1) and (in2 is mf1) and (in3 is mf3) then (out1 is mf2)
- If (in1 is mf1) and (in2 is mf2) and (in3 is mf1) then (out1 is mf2)
- If (in1 is mf1) and (in2 is mf2) and (in3 is mf2) then (out1 is mf2)
- If (in1 is mf1) and (in2 is mf2) and (in3 is mf3) then (out1 is mf3)
- If (in1 is mf1) and (in2 is mf3) and (in3 is mf1) then (out1 is mf3)
- If (in1 is mf1) and (in2 is mf3) and (in3 is mf2) then (out1 is mf3)
- If (in1 is mf1) and (in2 is mf3) and (in3 is mf3) then (out1 is mf4)
- If (in1 is mf1) and (in2 is mf4) and (in3 is mf1) then (out1 is mf4)
- If (in1 is mf1) and (in2 is mf4) and (in3 is mf2) then (out1 is mf4)
- If (in1 is mf1) and (in2 is mf4) and (in3 is mf3) then (out1 is mf5)
- If (in1 is mf3) and (in2 is mf4) and (in3 is mf3) then (out1 is mf6)
- If (in1 is mf3) and (in2 is mf4) and (in3 is mf2) then (out1 is mf6)
- If (in1 is mf3) and (in2 is mf4) and (in3 is mf1) then (out1 is mf5)
- If (in1 is mf3) and (in2 is mf3) and (in3 is mf3) then (out1 is mf5)
- If (in1 is mf3) and (in2 is mf3) and (in3 is mf2) then (out1 is mf5)
- If (in1 is mf3) and (in2 is mf3) and (in3 is mf1) then (out1 is mf4)
- If (in1 is mf3) and (in2 is mf2) and (in3 is mf3) then (out1 is mf4)
- If (in1 is mf3) and (in2 is mf2) and (in3 is mf2) then (out1 is mf4)
- If (in1 is mf3) and (in2 is mf2) and (in3 is mf1) then (out1 is mf3)
- If (in1 is mf3) and (in2 is mf1) and (in3 is mf3) then (out1 is mf3)
- If (in1 is mf3) and (in2 is mf1) and (in3 is mf2) then (out1 is mf3)
- If (in1 is mf3) and (in2 is mf1) and (in3 is mf1) then (out1 is mf2)
- If (in1 is mf2) and (in2 is mf1) and (in3 is mf1) then (out1 is mf2)
- If (in1 is mf2) and (in2 is mf1) and (in3 is mf2) then (out1 is mf2)
- If (in1 is mf2) and (in2 is mf1) and (in3 is mf3) then (out1 is mf3)
- If (in1 is mf2) and (in2 is mf4) and (in3 is mf3) then (out1 is mf5)
- If (in1 is mf2) and (in2 is mf4) and (in3 is mf2) then (out1 is mf5)
- If (in1 is mf2) and (in2 is mf4) and (in3 is mf1) then (out1 is mf4)
- If (in1 is mf2) and (in2 is mf2) and (in3 is mf1) then (out1 is mf3)
- If (in1 is mf2) and (in2 is mf2) and (in3 is mf2) then (out1 is mf3)
- If (in1 is mf2) and (in2 is mf2) and (in3 is mf3) then (out1 is mf4)
- If (in1 is mf2) and (in2 is mf3) and (in3 is mf3) then (out1 is mf4)
- If (in1 is mf2) and (in2 is mf3) and (in3 is mf2) then (out1 is mf4)
- If (in1 is mf2) and (in2 is mf3) and (in3 is mf1) then (out1 is mf3)

Графоаналитические решения уравнения гармбаланса и результаты моделирования для данной системы, а также для аналогичной системы с коэффициентом усиления 0,2 представлены на рис.11, 12. Как видно при  $K_{oy}=0,8$  в системе есть периодические

колебания с частотой  $\omega=1,75$  рад/с и  $A=0,18$  (рис.11а,б); при  $K_{oy}=0,2$  переводческих колебаний нет (рис.12 а,б).

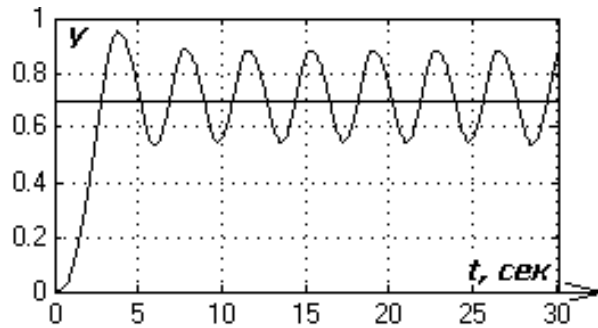


Рис.11 а.

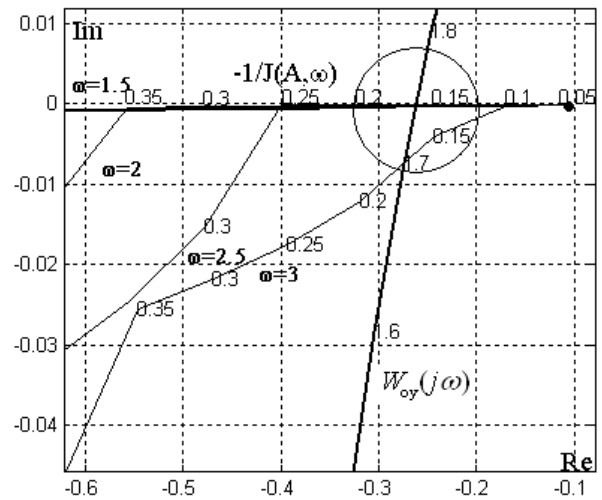


Рис.11 б.

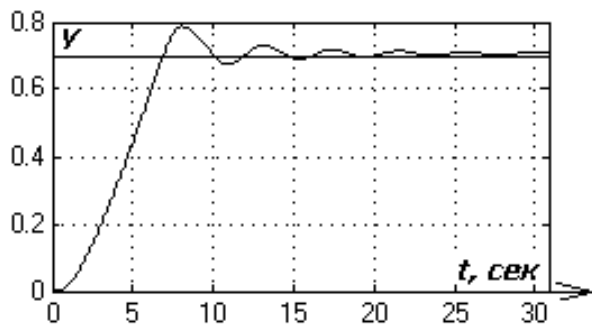


Рис.12 а.

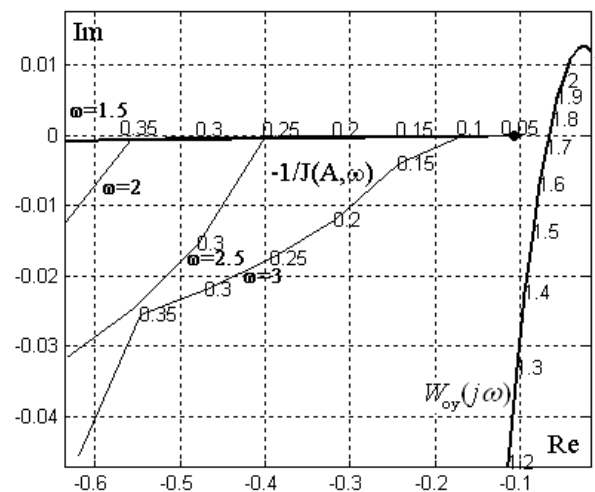


Рис.12 б.

### Заключение

Хотя в данной статье решается задача исследования периодических колебаний в ИСАУ с нечеткими регуляторами, результаты ее имеют более общий характер. Действительно, если использовать известное преобразование типа ANFYS, то можно нечеткий регулятор преобразовать в нейро-нечеткий и таким образом распространить полученные результаты на новый класс ИСАУ.

Кроме того, в сочетании с результатами работы [5], где разрабатываются критерии абсолютной устойчивости ИСАУ, мы получаем гораздо более полную картину динами-

ки ИСАУ. При этом, чем сложнее объект управления и чем выше порядок описывающей его модели, тем точнее результаты, полученные по методу гармбаланса.

И, наконец, если развивать известные из теории автоматического управления методики косвенной оценки качества нелинейных систем, то, пользуясь результатами данной статьи, можно разработать несложную методику оценки перерегулирования в ИСАУ с нечетким регулятором по показателю колебательности нелинейной системы.

### Список литературы

1. Нечеткое моделирование и управление. А Легат. - М.: Бином, Лаборатория знаний, 2009.
2. Интеллектуальные системы автоматического управления./ Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576с.
3. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления/ И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов; [отв. ред. И.М. Макарова]; Отделение информ. технологий и вычислит. систем РАН. – М.: Наука, 2006. – 333 с.
4. Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем управления/отв. ред. И.М. Макаров, В.М. Лохин; Отд-ие информ. технологий и вычисл. систем РАН. – М.: Наука, 2009. – 228 с.
5. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Ситников М.С. Устойчивость интеллектуальных систем управления. Приложение к журналу «Информационные технологии» № 2, 2013.