

ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОГО ЛОГИЧЕСКОГО ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ

В. М. ШПАКОВ[♦]

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

СПИИРАН, 14-я линия ВО, д. 39, Санкт-Петербург, 199178

<vlad@iiias.spb.su>

УДК 681.3.06

Шпаков В. М. **Пример применения гибридного логического закона управления** // Труды СПИИРАН. Вып. 7. — СПб.: Наука, 2008.

Аннотация. Рассматривается закон автоматического управления, использующий переключения между оптимальным по быстродействию четко логическим законом и нечетко логическим законом. Приводится спецификация имитационной модели системы автоматического позиционирования ролика на плоскости, использующей рассматриваемый закон управления. Обсуждаются результаты экспериментального исследования применения данного гибридного логического закона управления. — Библ. 3 назв.

UDC 681.3.06

Shpakov V. M. **A case study of a hybrid logic control law application** // SPIIRAS Proceedings. Issue 7. — SPb.: Nauka, 2008.

Abstract. A control law which uses switching between an optimal on response crisp logic control law and fuzzy logic law is considered. Specification of a simulation model of a control system for positioning a roll on a beam with described control law is produced. Results of experimental investigation of the hybrid control law application are discussed. — Bibl. 3 items.

1. Введение

Применение современных компьютеров при построении систем управления позволяет наряду с естественно научными знаниями использовать эвристические знания экспертов по управлению конкретными объектами. Это делает возможным реализацию стратегий управления, обеспечивающих приемлемое качество управления неустойчивыми, плохо определенными объектами и объектами с изменяющейся в широких пределах динамикой. В статье рассматривается закон управления, осуществляющий переключения между релейным (четко логическим) и нечетко логическим законами управления. Поскольку при использовании такого закона производятся дискретно-событийные изменения динамики процесса управления, то этот закон следует отнести к классу гибридных законов управления.

Показана эффективность применения рассматриваемого закона управления для решения задачи позиционирования ролика на плоскости. Эта задача состоит в управлении углом наклона плоскости с целью перемещения ролика в заданную позицию. При больших рассогласованиях целесообразно использовать релейный закон управления, который за минимальное время (при заданном ограничении максимального значения угла наклона плоскости) переведет ролик в положение, близкое к заданному. Релейный закон управления реализует дискретно-событийную зависимость угла наклона плоскости от рассогласо-

[♦] Данная работа была частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-07-00252-а).

вания и скорости его изменения. Поэтому при его использовании установившимся режимом будут автоколебания около заданного положения с частотой и амплитудой, зависящими от динамики привода поворота плоскости и инерционности ролика. Нечетко логический закон управления реализует непрерывную зависимость угла наклона плоскости от рассогласования и скорости. Поэтому для обеспечения плавного приближения к установившемуся состоянию и сохранения устойчивого положения ролика в заданной позиции предлагается при малых рассогласованиях производить переключение управления на реализацию нечетко логического закона управления.

Использование нечетко логического управления получило к настоящему времени очень широкое распространение. Диапазон его применения простирается от мини-контроллеров бытовой техники до ответственных систем управления подвижными объектами [1]. Это объясняется основным достоинством этого управления, которое определяется возможностью использования для формирования управляющих воздействий эвристических знаний экспертов. При этом данные о состоянии объекта в результате фазификации переводятся в обобщенную форму (лингвистические переменные), удобную для формализации знаний экспертами. Нечетко логическое управление в случаях сложных, плохо определенных объектов часто оказывается единственным средством, позволяющим обеспечить приемлемое качество управления. Фактором, сдерживающим распространение данного вида управления, является недостаточное развитие удовлетворительных формальных методов исследования нечетко логических систем управления. Кроме того, конечно не всегда могут быть получены надежные экспертные знания о поведении объекта. Этим объясняется тот факт, что разработка нечетко логических и гибридных систем чаще всего проводится с использованием имитационного моделирования.

2. Система позиционирования ролика на плоскости

Схема позиционирования ролика на плоскости приведена на рис. 1. Положение ролика определяется координатой X ; X_3 – координата заданной позиции ролика. Рассогласование, или ошибка позиционирования, обозначена ΔX .

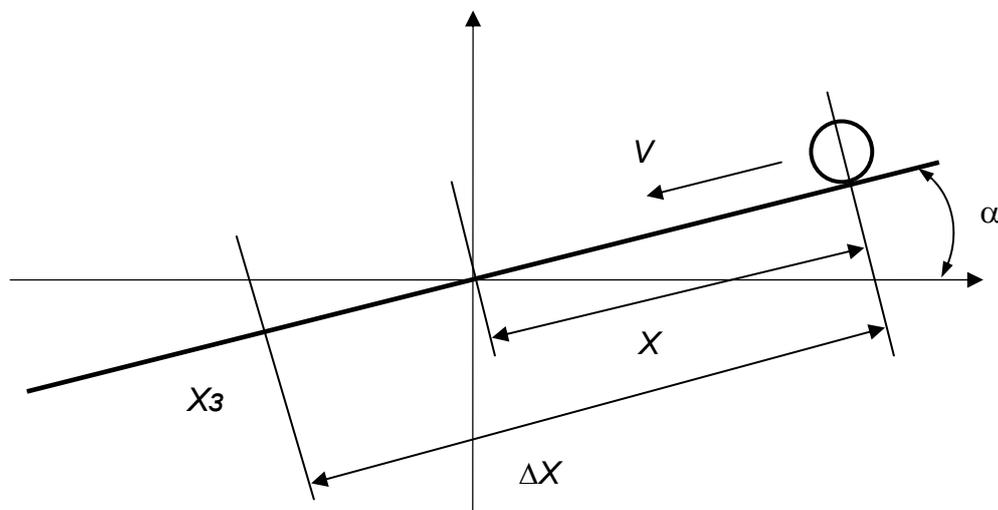


Рис. 1. Позиционирование ролика на плоскости.

Управление положением ролика производится путем изменения угла наклона плоскости α . Угол наклона однозначно определяет ускорение ролика. Конкретная зависимость ускорения от угла определяется моментом инерции ролика. В случае ролика в виде тонкостенного цилиндра для ускорения будем иметь

$$a = 0.5g \sin \alpha, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, α – угол наклона плоскости. Перемещение связано с ускорением двойной интегральной зависимостью. С учетом динамики привода поворота плоскости передаточную функцию объекта для малых углов ($\alpha \approx \sin \alpha$) можно представить в следующем виде:

$$W_o = \frac{X}{\alpha} = \frac{K_n \cdot 0.5g}{(T_n p + 1)p^2}, \quad (2)$$

где K_n – коэффициент передачи привода, T_n – постоянная времени привода, p – оператор дифференцирования.

Объект управления и рассматриваемые законы управления моделировались в созданной в СПИИРАН среде разработки исполняемых спецификаций гибридных процессов (EnvCon) [2]. В среде EnvCon структура модели задается с помощью логического и вещественного векторов состояния, а процессы специфицируются с помощью продукционных правил, предикатов от непрерывных состояний и правил запуска алгоритмов вычисления транзитивных отношений для непрерывных состояний. В совокупности указанные средства обеспечивают достаточно широкие возможности для формализации знаний о логике и динамике поведения систем [3].

Протекающие в данном объекте процессы являются непрерывными. Поэтому их спецификация содержит только правила, определяющие транзитивные процедуры трансформации соответствующих непрерывных состояний. На рис. 2 представлена часть формы редактора правил среды EnvCon, содержащая указанные правила.

№	Состояние	Процедура	Кэфф.	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация
1	Угол	Интеграл	50.00	Дельта(угол)		Истина
2	Sin(угол)	Синус	1.0	Угол		Истина
3	Ускорение	Пропорц.	-490.5	Sin(угол)		Истина
4	Скорость	Интеграл	1.00	Ускорение		Истина
5	Положение X	Интеграл	1.0	Скорость		Истина
6	Угол * 5	Пропорц.	5.0	Угол		Истина
7	Угол (рад)	Пропорц.	0.017452	Угол		Истина

Рис. 2. Спецификация объекта управления.

Правило 3 определяет связь ускорения с синусом угла, заданную формулой (1). Правила 4 и 5 определяют интегральные зависимости скорости и положения соответственно от ускорения и скорости. Эти правила соответствуют физическим законам, которые выполняются всегда, поэтому в их условных частях использована логическая константа. Последние два правила производят преобразования масштаба представления угла и используются только для визуа-

лизации. Аргументом первого правила является разность между заданным и реальным углами наклона плоскости (Дельта (угол)). Она вычисляется в контроллере. Коэффициент этого правила определяет постоянную времени привода.

Использование для управления данным объектом традиционных законов управления (например, пропорционально дифференциального закона) не позволяет получить высокое качество переходных процессов для значительных диапазонов изменения положения ролика. Особенностью объекта является то, что угол может изменяться в ограниченных пределах. Физическими ограничениями изменений угла являются углы $\pm 90^\circ$. Реальными ограничениями являются значения угла, при которых трение скольжения становится меньше трения качения. Если выбрать параметры пропорционально дифференциального закона такими, чтобы в заданном диапазоне отклонений изменения угла были в пределах ограничений, то быстродействие системы будет очень низким. Если в контроллере ввести ограничение на задаваемый угол, то качество переходного процесса будет существенно зависеть от величины рассогласования. В этом случае высокое качество переходного процесса можно обеспечить только для узкого диапазона отклонений. Использование гибридного закона управления позволяет получить высокое качество переходных процессов для широкого диапазона отклонений.

3. Релейный закон управления

Релейный, или четко логический, закон реализует оптимальную по быстродействию стратегию управления. При этом траектория движения состоит из участка разгона, на котором скорость растет по абсолютной величине с максимально допустимым ускорением, и участка торможения, на котором скорость по абсолютной величине уменьшается также с максимально допустимым ускорением. В случае управления положением ролика на плоскости максимальное ускорение соответствует максимальному углу наклона плоскости. Знак угла и, следовательно, знак ускорения зависят от знака рассогласования и от участка траектории движения. Таким образом, управление состоит в дискретном изменении угла с одного максимально допустимого значения на максимально допустимое значение противоположного знака. Точка переключения при заданном постоянном ускорении торможения a определяется следующим соотношением между рассогласованием $E_{\text{перекл}}$ и скоростью его изменения V :

$$E_{\text{перекл}} = \frac{V^2}{2a}, \quad (3)$$

где a – ускорение торможения.

Для моделирования максимально допустимые углы наклона плоскости были приняты равными $\pm 30^\circ$. С учетом этого и (1) соотношение (3) будет иметь вид $E_{\text{перекл}} = \pm 0.0020387V^2$. На рис. 3 представлена часть формы редактора правил среды EnviCon, содержащая правила трансформации задаваемого контроллером угла наклона.

Первое правило формирует отклонение текущей позиции ролика от заданного значения. Второе вычисляет скорость изменения этого отклонения. Правило 3 формирует максимально допустимое положительное значение ($U_{\text{ГОЛРВ}}$)

заданного угла в случае истинности положительного управляющего воздействия (U_{PB}), а правило 4 отрицательное значение (U_{NB}) в случае истинности отрицательного управляющего воздействия (U_{NB}). Пятое правило вычисляет положительное рассогласование переключения ($E_{перекл}$) в соответствии с (3). С целью компенсации инерционности привода целесообразно переключение на режим торможения производить несколько раньше достижения расчетной точки, т.е. вводить некоторое упреждение. Правило 6 вычисляет рассогласование переключения с учетом введения упреждения.

№	Состояние	Процедура	Кэфф.	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация
1	X отклонение	Сумма	-1.00	X заданн.	X ОС	EverTrue
2	Угол отклон	Сумма	-1.0	Угол заданн	Угол ОС	EverTrue
3	Производн(X)	Производ.	1.0	X ОС		EverTrue
4	Угол заданн	Пропорц.	1.0	Угол PB		U_{PB}
5	Угол заданн	Пропорц.	1.0	Угол NB		U_{NB}
6	Переключ. X	Умнож..	0.0020387	Производн(X)	Производн(X)	EverTrue
7	Переключ. P	Сумма	1.0	Переключ. X	Упреждение	EverTrue
8	Переключ. N	Пропорц.	-1.0	Переключ. P		EverTrue

Рис. 3. Правила спецификации релейного закона управления.

Логические переменные (U_{PB} , U_{NB}), задающие управляющие воздействия, определяются с помощью продукционных правил, приведенных на рис. 4. Как видно из рисунка, условная часть продукционных правил представляет собой конъюнкцию предикатов от текущего рассогласования и рассогласования, при котором производится переключение, и от скорости. Предикаты от скорости введены в продукционные правила для того, чтобы логика закона управления сохранялась при любых начальных значениях скорости и рассогласования.

0. If	$E > E_{переклP}$	$V > 0$
then	U_{NB}	
1. If	$E > E_{переклP}$	$V > 0$
then	U_{PB}	
2. If	$E < E_{переклN}$	$V < 0$
then	U_{PB}	
3. If	$E < E_{переклN}$	$V < 0$
then	U_{NB}	

Рис. 4. Правила трансформации управляющих воздействий.

На рис. 5 приведены графики переходных процессов, возникающих в модели системы позиционирования ролика при использовании описанного релейного закона управления, при заданном значении координаты, равном 0, и начальном – 300. Значения угла наклона представлены в увеличенном масштабе с коэффициентом 5. Это сделано для наглядности визуализации. Масштабный коэффициент по времени установлен равным 0.0067, т.е. одна секунда представляется 150 делениями.

Как видно из рисунка, переходный процесс состоит из двух четко выраженных участков – участка разгона и участка торможения. Углы наклона на каждом из участков равны максимально допустимым значениям $\pm 30^\circ$ соответственно. Некоторое сглаживание кривой при переключении угла определяется инерционностью привода. В экспериментах привод моделировался апериодическим звеном с постоянной времени $T=0.020$. Данный закон обеспечивает максимально быстрое перемещение ролика в заданную позицию, но при этом установившимся состоянием являются автоколебания. Угол наклона изменяется с достаточно высокой частотой. Хотя при этом амплитуда колебаний ролика оказывается незначительной, эти автоколебания всегда являются недопустимыми по соображениям эксплуатации привода.

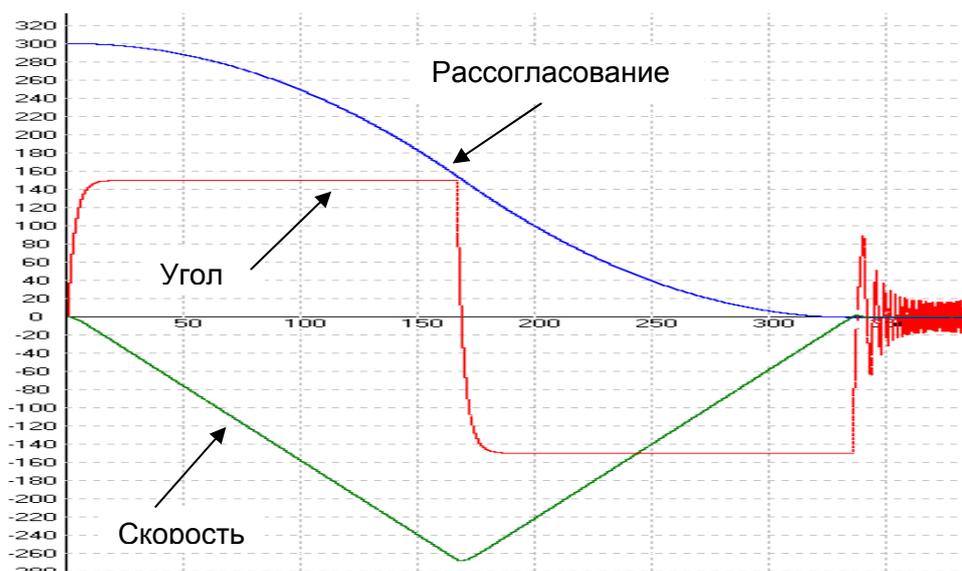


Рис. 5. Переходные процессы при релейном законе управления.

4. Нечетко логический закон управления

Нечетко логический закон управления позволяет реализовать непрерывную, достаточно плавную зависимость управляющего воздействия (угла наклона) от рассогласования и скорости. При такой зависимости автоколебания в установившемся режиме будут отсутствовать. Реализация этого закона состоит из трех этапов: фазификация, обработка трансформационных правил и дефазификация. На этапе фазификации вычисляются истинностные оценки лингвистических переменных для входных значений рассогласования и скорости. При этом используются задаваемые экспертом функции принадлежности входных числовых переменных к лингвистическим переменным.

Трансформационные правила представляют собой импликации, условные части (антецеденты) которых содержат конъюнкции лингвистических переменных рассогласования и скорости, а исполнительные части (консеквенты) — лингвистические переменные угла наклона плоскости. Обработка правил заключается в вычислении оценок истинности лингвистических переменных угла. При этом для нечеткой логики оценка истинности консеквента импликации равна оценке истинности ее антецедента, т.е. конъюнкции входных лингвистических переменных. А оценка конъюнкции равна минимальной из оценок ее аргументов. Одни и те же лингвистические переменные могут задаваться несколькими

различными правилами. Такие переменные соединены друг с другом логическими связками \wedge , т.е. составляют дизъюнкцию. Истинностная оценка дизъюнкции равна максимальной из оценок ее аргументов.

На этапе дефазификации по функции принадлежности лингвистических переменных угла наклона к числовому множеству углов и найденным оценкам истинности этих переменных находится числовое значение угла наклона. Существуют различные алгоритмы дефазификации. Центроидный алгоритм дефазификации является одним из наиболее распространенных. Алгоритм вычисляет для каждой выходной переменной площадь и абсциссу центра тяжести трапеции, ограниченной соответствующей функцией принадлежности и прямой, параллельной оси абсцисс, отстоящей от нее на величину истинностной оценки. Вещественное значение выходной переменной принимается равным среднему взвешенному центру тяжести всех трапеций, соответствующих выходным лингвистическим переменным.

В использованной для моделирования рассматриваемой системы компьютерной среде EnviCon реализована транзитивная процедура, вычисляющая вещественную функцию от двух вещественных аргументов с помощью описанных алгоритмов, основанных на использовании нечеткой логики. Процедура позволяет вычислять следующее значение заданного угла по текущим значениям рассогласования и скорости.

$$\alpha_3 = F(E, V). \quad (4)$$

В данной среде имеется интерфейс, позволяющий формировать пятизначные функции принадлежности для двух входных переменных и одной выходной, а также указывать имена выходных лингвистических переменных в исполнительных частях нечетко логических трансформационных правил. Такой интерфейс с выбранными для моделирования значениями переменных представлен на рис. 6.

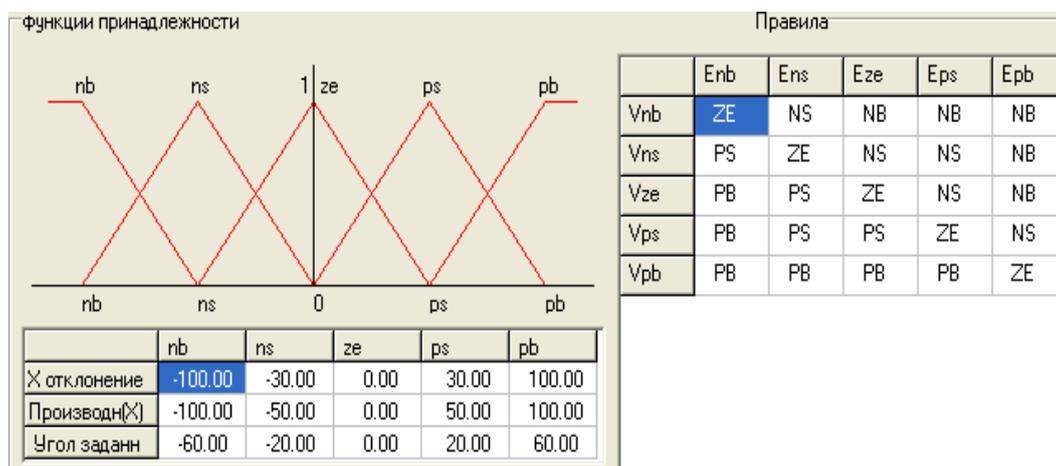


Рис. 6. Формирование нечетко логического закона управления.

В интерфейсе использованы общепринятые обозначения для пяти лингвистических переменных: отрицательная большая (nb), отрицательная маленькая (ns), равная нулю (ze), положительная маленькая (ps) и положительная большая (pb). В случае пятизначных функций принадлежности и двух входных переменных имеются 25 трансформационных правил. Правила представлены в виде таблицы. Имена входных переменных, составляющих конъюнкции условных частей правил, приведены в названиях строк и столбцов, а имена пе-

ременных исполнительных частей правил — на пересечениях соответствующих строк и столбцов. В данном случае задаваемая правилами стратегия управления достаточно очевидна. Например, при большом рассогласовании и любой скорости, направленной от согласованного положения, управляющее воздействие должно быть большим и направленным на уменьшение рассогласования. Если же при большом рассогласовании имеется большая скорость уменьшения этого рассогласования, то воздействие может быть нулевым. Аналогичным образом, рассматривая ситуации, определенные условными частями правил, трудно задать переменные исполнительных частей этих правил.

На рис. 7 приведены кривые переходных процессов, полученные при применении нечетко логического закона управления, специфицированного функциями принадлежности и правилами, представленными на рис. 6.

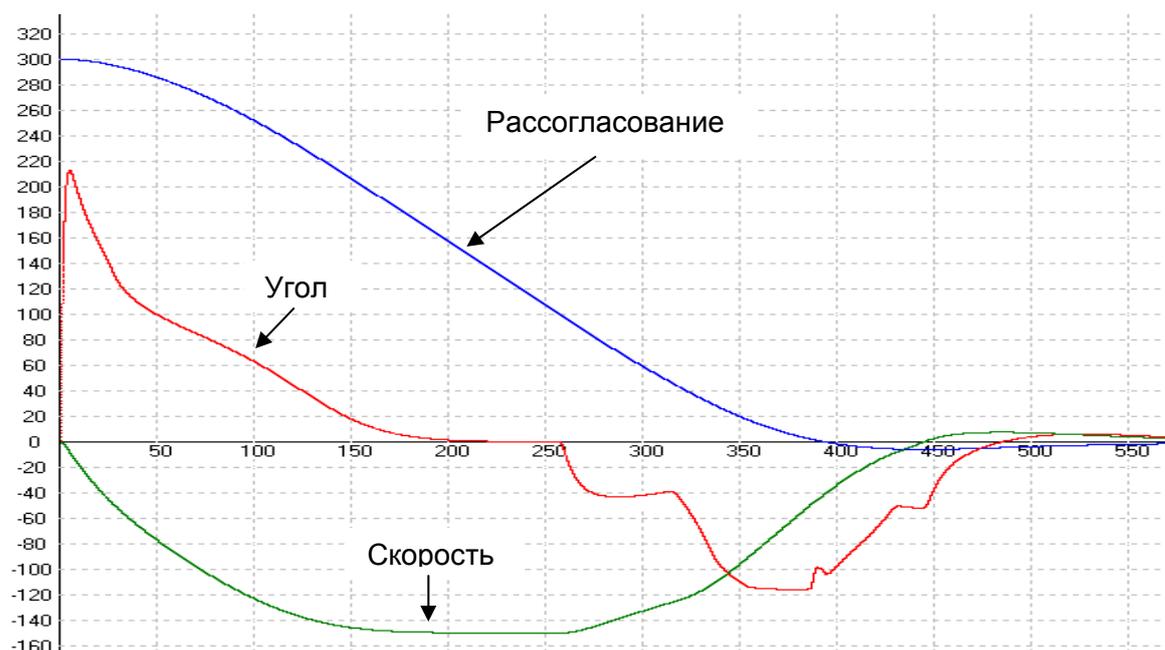


Рис. 7. Переходные процессы при нечетко логическом законе управления.

Как видно из рисунка, участок разгона в этом случае состоит из скачкообразного увеличения угла, за которым следует плавное его уменьшение. Имеется участок движения с нулевым ускорением, т.е. с постоянной скоростью. На участке торможения сначала происходит плавный рост угла, а затем его плавное уменьшение до нуля. Сравнение этих переходных процессов с процессами, приведенными на рис. 4, показывает, что они имеют большую длительность. Более тщательной настройкой параметров нечетко логического закона управления можно добиться некоторого сокращения времени. Тем не менее длительность переходных процессов в этом случае всегда будет больше, чем при использовании релейного закона.

5. Гибридный закон управления

Основная идея функционирования гибридного закона управления состоит в том, чтобы при больших рассогласованиях использовать релейный закон управления, который обеспечит максимально быстрый перевод ролика в окрестность согласованного положения, а при малых значениях рассогласования

производить переключения на нечетко логический закон управления, который обеспечит плавный переход и стабилизацию в согласованном состоянии. Таким образом, для реализации гибридного закона управления необходимо осуществлять переключения между релейным и нечетко логическим законами управления. Структурная схема гибридной системы управления приведена на рис. 8.

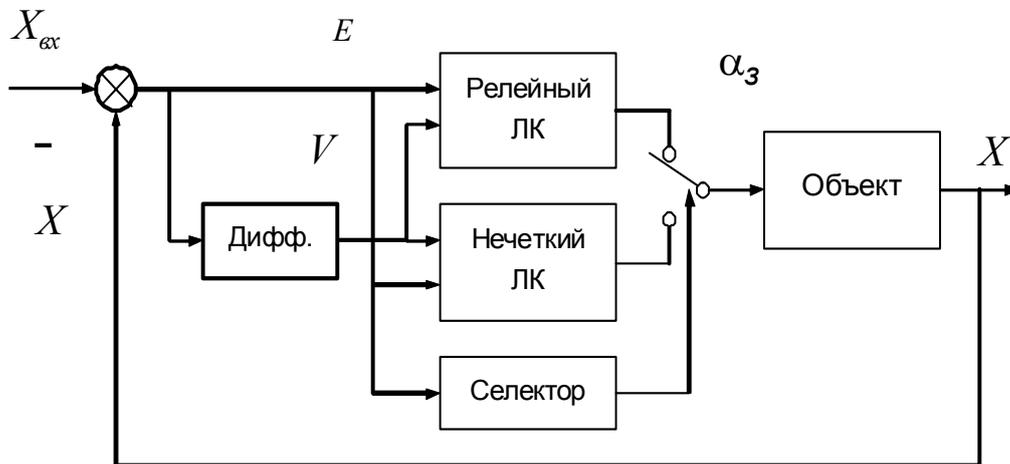


Рис. 8. Структурная схема системы.

Система содержит релейный и нечетко логический контроллеры. Переключения законов управления осуществляются с помощью селектора. Значение рассогласования, при котором целесообразно переключать законы управления должно задаваться экспертом для каждого конкретного объекта управления. Для спецификации гибридного закона управления восемь правил спецификации релейного закона (рис. 3) необходимо дополнить следующим правилом, специфицирующим нечетко логический закон (4):

$$(-10 < E < 10) \rightarrow \alpha_3 := F(E, V).$$

Функционирование селектора реализовано путем включения в условную часть этого правила предиката от ошибки и от заданных значений рассогласования переключения. Кривые переходных процессов, полученные при моделировании гибридного закона управления, представлены на рис. 9.

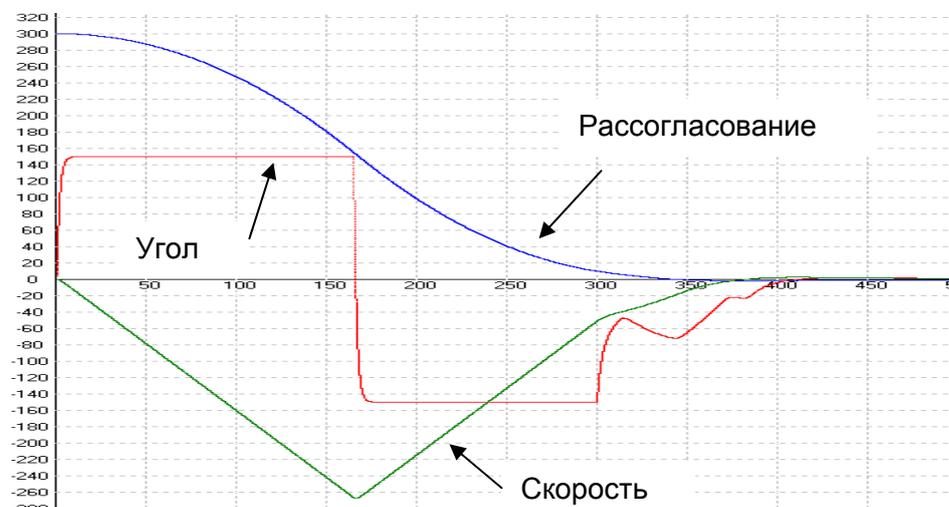


Рис. 9. Переходные процессы при гибридном логическом законе управления.

Пока рассогласование больше 10, функционирует релейный закон. Он вначале устанавливает максимальный положительный угол, а затем изменяет его на угол, противоположный по знаку. Когда ошибка становится равной 10, производится переключение на нечетко логический закон и рассогласование плавно изменяется до нуля. Сравнение данных переходных процессов с процессами на рис. 5 показывает, что их длительность практически совпадает со временем перевода системы в согласованное состояние с помощью релейного закона, но автоколебания в данном случае отсутствуют.

5. Заключение

Показана эффективность применения гибридного закона для управления положением ролика на плоскости. Рассмотренный пример является удобным с той точки зрения, что логика управления в данном случае достаточно очевидна. Совместное использование четкого и нечеткого логических управлений может быть эффективным для различных объектов. Прежде всего это объекты, в которых могут возникать большие рассогласования при наличии ограничений на управляющие воздействия. Такие объекты имеются, например, в мехатронике.

Литература

1. *Tomas David E., Brian Armstrong Helouvy* Fuzzy Logic Control — A Taxonomy of Demonstrated Benefits // Proceedings of the IEEE. 1995. Vol. 83, N3. P. 407–421.
2. *Шпаков В. М.* Прототип среды моделирования структурированных совокупностей взаимодействующих процессов // Сб. докл. конф. «Имитационное моделирование. Теория и практика». Спб. : ФГУП ЦНИИ технологии судостроения, 2005. Т. 2. С. 292–295.
3. *Шпаков В. М.* Ситуационные спецификации имитационных моделей гибридных реактивных систем // Труды СПИИРАН.— Спб.: СПИИРАН, 2002. Вып. 1, т. 2. С. 212–222.