

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра автоматизированного электропривода

П.А. Воронин

# **ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗЗИ-УПРАВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ**

Методические указания

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом  
Государственного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург  
ИПК ГОУ ОГУ  
2010

УДК 62-83(07)  
ББК 31.291я 7  
В 75

Рецензент – кандидат технических наук Э. Л. Греков

**Воронин, П.А.**

В 75 Применение фаззи-управления в электроприводах: методические указания по курсу «Монтаж, наладка, эксплуатация и диагностика электроприводов» / П.А. Воронин; Оренбургский гос. ун-т – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2010. - 30с.

Методические указания предназначены для студентов специальности 140604 - Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов очной и заочной формы обучения, изучающих дисциплину «Монтаж, наладка, эксплуатация и диагностика электроприводов».

УДК 62-83(07)  
ББК 31.291я 7

В 2202090100

© Воронин П.А. 2010  
© ГОУ ОГУ, 2010

## Содержание

Введение .....	4
1 Структура электромеханической системы технологического комплекса.....	5
2 Логические системы управления на основе фаззи - логики .....	8
3 Термины и понятия фаззи-логики.....	10
4 Структура и алгоритм фаззи-управления.....	13
5 Пример использования фаззи-регуляторов в позиционных электроприводах.....	15
6 Пример использования фаззи-регуляторов в электроприводах подъемно- транспортных механизмов.....	19
7 Использование фаззи-управления в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе.....	22
8 Автоматическая настройка параметров регулятора скорости с использованием фаззи-логики .....	24
9 Реализация фаззи-управления.....	26
Список использованных источников.....	30

## Введение

Системы управления, формирующие алгоритм управления, основанный на законах классической логики и реализуемый с помощью релейных элементов и программируемых контроллеров, вырабатывая команды на выполнение электроприводом технологической задачи, относятся к верхнему (технологическому) уровню управления. Отдельные логические узлы могут входить в состав системы управления собственно электропривода, называемой системой управления нижнего уровня, которая непосредственно формирует свойства электропривода. Примером может служить логическое переключающее устройство (ЛПУ) системы управления реверсивного тиристорного электропривода постоянного тока с разделным управлением группами тиристорov (серийно выпускаемые преобразователи ЭПУ 1-2, БУ 3601 и др.).

Появившиеся относительно недавно системы управления с фаззи-логикой расширяют функциональные возможности управления и оказываются более эффективными, чем традиционные системы, в выполнении задач управления для ряда сложных, трудно описываемых, нелинейных объектов управления, среди которых имеют место и электроприводы различного назначения и, прежде всего, позиционные электроприводы.

Цель данного пособия – ознакомить студента с алгоритмами фаззи-управления и структурой фаззи-регулятора, особенностями фаззи-управления в позиционных и других электроприводах.

## **1 Структура электромеханической системы технологического комплекса**

В соответствии с ГОСТ Р 50369 понятие «Электропривод» конкретизирует объект управления, которым является двигатель (Д) совместно с механической передачей (МП) и электрическим преобразователем (П), - сильноточную часть, осуществляющую силовое воздействие на рабочий орган производственной установки, и систему управления электропривода (СУЭП), - слаботочную часть, формирующую алгоритм управления.

По функциональному назначению управление в электроприводах разделяется на два уровня: верхний - технологический, являющийся внешним уровнем относительно электропривода, и нижний - внутренний относительно электропривода. На верхнем уровне система управления СУЭП1 (по ГОСТ Р 50369 – система управления электроприводом) вырабатывает технологическое задание на движение рабочих органов отдельной технической установки (например, станка, крана, лифта) или целой технологической системы (например, системы водоснабжения, теплоснабжения, электроснабжения). В задачу СУЭП1 не входит формирование свойств собственно электропривода, его статических, динамических, точностных характеристик.

Данная задача возлагается на систему управления нижнего уровня СУЭП2 (по ГОСТ Р 50389 – система управления электропривода), которая является неотъемлемой частью понятия «электропривод».

Таким образом, рабочий орган (РО), движущийся при работе двигателя, но физически принадлежащий производственной установке (рабочей машине), рассматривается как составная часть понятия «технологический комплекс». Это сделано по тем соображениям, что СУЭП1, СУЭП2, П, Д, МП, РО, имеющие друг с другом внешние и внутренние прямые и обратные связи, образуют совместно единую динамическую электромеханическую систему (рисунок 1.1). В этой системе входом является задающий сигнал на СУЭП1, выходом - движение РО (или движения нескольких РО). Только при совместном рассмотрении составных час-

тей данной электромеханической системы можно определить все статические и динамические показатели и оценить качество конкретно электропривода.

В терминологии заводов-изготовителей электропривод как изделие именуется комплектным электроприводом, в состав которого входят СУЭП2, электрический преобразователь и двигатель, а иногда и редуктор.



Рисунок 1.1 - Структурная схема электромеханической системы технологического комплекса

В чем конкретно состоят задачи, возлагаемые на СУЭП1 и СУЭП2, рассмотрим на примере электропривода лифта. Система СУЭП1 выполняет задачу автоматизации работы лифта: вырабатывает команды автоматического выбора направления движения кабины, начала движения, торможения и остановки, определения этажей для остановок. Система СУЭП2 формирует плавные динамические процессы разгона и торможения двигателя, обеспечивает необходимые для точной остановки диапазон регулирования скорости и жесткость механических

характеристик двигателя. Различаясь функционально, СУЭП1 и СУЭП2 конструктивно могут быть выполнены из разных блоков, но могут и объединяться в общей панели управления или в современном едином универсальном управляющем устройстве - программируемом контроллере.

Таким образом, дополнительными признаками классификации систем управления технологических комплексов являются:

- уровень управления: верхний (технологический); нижний (формирующий свойства электропривода);

- тип алгоритма управления: линейный; нелинейный; аналитический; логический на основе жесткой (классической) логики; логический на основе нежесткой логики (фаззи-логики);

- технологическая координата электропривода: скорость рабочего органа; положение рабочего органа;

- технологическая координата технологического комплекса: положение рабочих органов комплекса; давление в магистрали; температура оборотной воды;

Сложность объекта управления и объем информации о нем при выборе структуры системы управления определяют место системы управления по отношению к традиционным методам управления (рисунок 1.2).

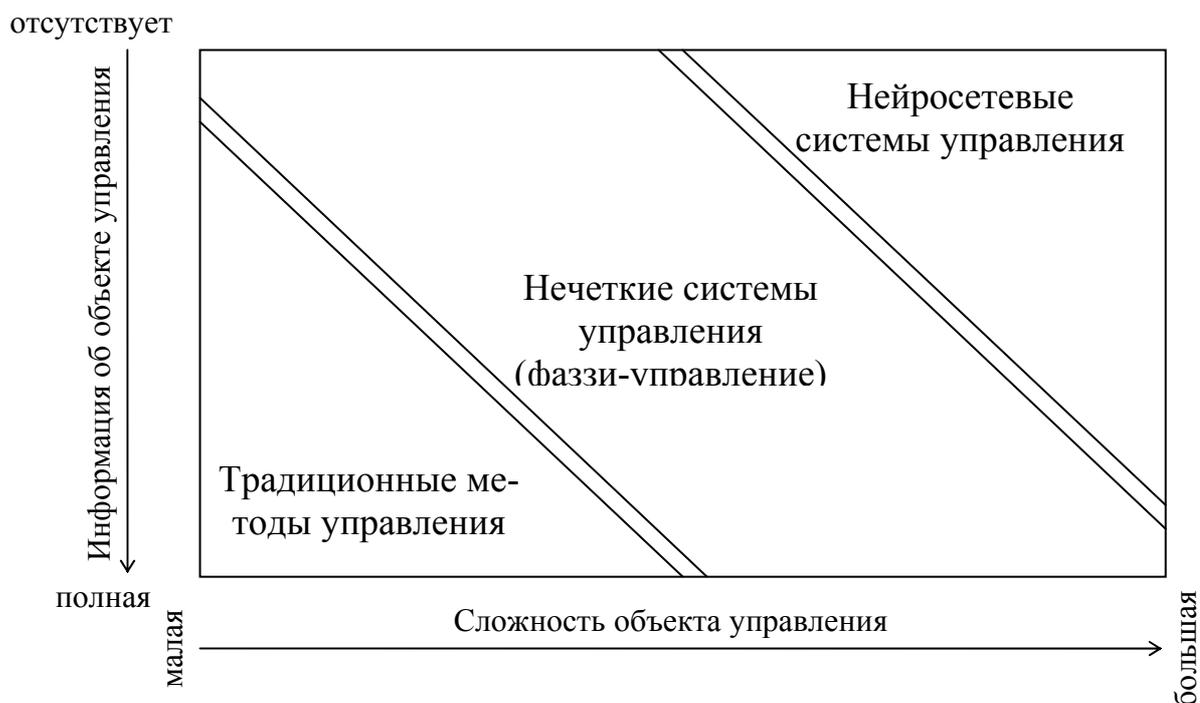


Рисунок 1.2 - Области эффективного применения различных систем управления

## 2 Логические системы управления на основе фаззи - логики

**Фаззи-логика в переводе с английского - нечеткая, нежесткая, приближенная логика.** Родившаяся в 60-е годы прошлого века как развитие теории множеств применительно к информационным системам, она находит сегодня все большее применение в различных технических системах как средство управления. Применительно к электроприводу фаззи-логика используется для определенного класса задач управления как верхнего, так и нижнего уровней.

Классическая логика с двумя качественными или количественными уровнями (истинно-ложно, да - нет, единица - ноль) не позволяет описать многообразие, многоцветность мира и ассоциативный (объединяющий в общие понятия) способ мышления человека. Этот пробел выполняет фаззи -логика, использующая многоуровневое представление физических величин и утверждений (таблица 2.1).

**В классической логике физические величины и утверждения делятся жестко, бескомпромиссно на два уровня. В фаззи-логике кроме крайних двух уровней имеются и промежуточные, при этом переход от одного уровня к другому не резкий, а с перекрытием соседних уровней.** Для определенных физических величин и фактов их двухуровневое классическое представление «истинно - ложно», «да - нет» полностью справедливо и точно. Например, на вопрос, движется ли рабочий орган, можно ответить только однозначно «да» или «нет». Но на вопрос, как движется рабочий орган (быстро, медленно, очень медленно), двухуровневая логика не дает ответ, а фаззи-логика позволяет его получить.

Таблица 2.1- Примеры уровней в классической логике и в фаззи-логике

Физическая величина или утверждение	Уровни в классической логике	Уровни в фаззи-логике
Световой фон	Белый - черный	Белый - светло-серый - темно-серый - черный
Тепловой режим	Холодный - теплый	Холодный - прохладный - теплый - жаркий
Скорость движения	Нулевая - ненулевая	Нулевая - малая - средняя - большая
Утверждение какого-либо факта	Да - нет	Да - скорее да, чем нет - ни да, ни нет - скорее нет, чем да - нет

Выделение уровней в логике - это ассоциативное свойство мышления человека, когда качественная характеристика физических величин и процессов, формируемая словесно (прилагательными, наречиями), оценивается количественно не отдельными числами, а некоторыми числовыми множествами с нерезкими границами.

Фаззи-логика является основой некоторых **интеллектуальных систем управления, в которых моделируется процесс мышления человека - процедура принятия им решения.** Схема данного процесса такова: оценка условий ситуации - их восприятие - принятие решения (логическое заключение на основе базы знаний) - исполнение.

К интеллектуальным относят сегодня многие системы управления, в том числе системы с фаззи-управлением (СФУ).

Достоинство СФУ – возможность для сложных и трудно математически описываемых объектов управления сформулировать на логической основе необходимые алгоритмы управления при многих входных переменных. Это позволяет повысить качество автоматизированного технологического процесса многих производственных систем. К данным системам можно отнести различные тепловые системы химического и фармацевтического производства, пищевой промышленности, системы газо- и теплоснабжения. В указанных системах общий регулятор технологического процесса с использованием фаззи-управления формирует задание, обрабатываемые электроприводом, на необходимые перемещения рабочих органов типа регулируемых механических вентилях, осуществляющих дозированную подачу газа, пара, воды и других жидкостей в соответствующих технологических установках. Данные рабочие органы приводятся в движение электроприводами, работающими в режимах позиционирования и являющимися по существу непосредственными регуляторами технологического процесса.

Кроме отмеченного типа рабочих органов, в автоматизированных технологических процессах могут использоваться и некоторые подъемно-транспортные и робототехнические установки, в которых требуемые перемещения должны выполняться соответствующими позиционными электроприводами (ПЭП) в автоматическом режиме.

От того, насколько качественно данные позиционные электроприводы осуществляют заданные технологическим регулятором перемещения рабочих органов, зависит и качество управляемого технологического процесса. Задачу – получить наибольшее быстродействие при отсутствии перерегулирования и в пределах требуемой точности позиционирования, можно считать актуальной задачей оптимизации рассматриваемой группы позиционных электроприводов по технологическому признаку.

В настоящее время имеется множество работ отечественных [1,3,5] и зарубежных авторов по системам фаззи-управления верхнего (технологического) уровня в бытовой технике, в ряде различных технических установок. Имеются работы и по фаззи-управлению нижнего уровня применительно к позиционным электроприводам нелинейных электромеханических систем с изменяющимися параметрами.

Интересными являются работы [5] по применению фаззи-управления в следящем электроприводе для некоторых установок, в которых фаззи-регулятор (ФР) является только дополнительным корректирующим средством для вспомогательных режимов, а главная задача управления режимом слежения возлагается на традиционные регуляторы.

Коль скоро для верхнего уровня управления рассматриваемых технологических установок используется фаззи-контроллер, то оказывается практически целесообразным с целью получения единообразной элементной базы управления возложить на этот контроллер и задачу оптимизации на нижнем уровне управления для позиционных электроприводов.

### **3 Термины и понятия фаззи-логики**

Фундаментальным понятием фаззи-логики, введенным ее основоположником американским профессором электротехники Л. Заде, является фаззи-множество (ФМ). В математической логике есть общее понятие множества как совокупности объектов, каждый из которых должен обладать или не обладать определенным свойством. Это множество характеризуется только одним показателем, все его объекты равноценны относительно определяющего его свойства. В

отличие от данного понятия множества фаззи-множество характеризуется двумя показателями [2,6], во-первых, фактом принадлежности объектов к множеству и, во-вторых, степенью их принадлежности к данному множеству. Применительно к техническим системам объектами ФМ являются значения некоторой физической переменной, например, значения температуры, скорости перемещения, электрического напряжения, тока и т.д. Словесное (лингвистическое) выражение физической переменной считается логической переменной в фаззи-логике. Свойством, объединяющим значения физической переменной в ФМ, является выделенная некоторая качественная оценка в лингвистической форме для логической переменной, например, отрицательная малая (NS), нулевая (Z), положительная средняя (PM), положительная большая (PB) и т.п. Качественные оценки ФМ (NS, Z, PM и др.) называются термами.

Степень принадлежности значений физической переменной  $x$  к ФМ, к данному терму, определяется так называемой функцией принадлежности (ФП)  $\mu(x)$ . Значения ФП определяются в пределах от 0 до 1 на интервале от  $x=a$ , где  $\mu(a) = 0$ , до  $x = b$ , где  $\mu(b) = 0$ . Внутри интервала  $[a, b]$  есть точка  $x = c$ , где  $\mu(c) = 1$ . По своему виду функция  $\mu(x)$  напоминает функцию распределения вероятности принадлежности значений  $x$  интервалу  $[a, b]$  с максимумом плотности вероятности, равным 1 в точке  $x = c$  и с плавным уменьшением от 1 в обе стороны до 0. Сходство  $\mu(x)$  с функцией распределения вероятности лишь внешнее, а по существу, определение параметров ФП (формы, места расположения центра  $c$  и границ интервала  $x$ ) возлагается на эксперта в соответствующей области. Часто функция принадлежности имеет вид треугольника.

«Треугольная» функция принадлежности переменной  $x$  в общем случае может быть задана аналитически следующим выражением:

$$\mu(x, a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{c-a}, & a \leq x \leq c, \\ \frac{b-x}{b-c}, & c \leq x \leq b, \\ 0, & b \leq x. \end{cases}$$

где  $a, b, c$  - некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные соотношением:

$$a \leq c \leq b.$$

Физическая переменная на заданном интервале  $X$  ее изменения от  $x_{min}$  до  $x_{max}$  характеризуется рядом ФМ ( $A_1, A_2, \dots, A_n$ ) с функциями принадлежности  $\mu_1(x), \dots, \mu_n(x)$ .

Если физическая переменная относится одновременно к двум термам, то возникает проблема, какое из двух значений ФП принять. Данная проблема решается компромиссно на основе принципов совмещения множеств, известных из математической логики, в форме трех операций:

а) усреднения, или конъюнкции (перемножение),  $K(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 \wedge \mu_2 = \min(\mu_1, \mu_2)$ - принцип минимума;

б) объединения, или дизъюнкции (сложение),  $D(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 \vee \mu_2 = \max(\mu_1, \mu_2)$ - принцип максимума;

и) инверсии или дополнения,  $\overline{\mu(x)} = 1 - \mu(x)$ .

Операции К и D взаимосвязаны:

$$K = 1 - D; \quad D = 1 - K.$$

Результат операций усреднения и объединения фаззи-множеств  $A_1$  и  $A_2$  одной переменной  $x$  приведен на рисунке 3.1,а. Штриховая линия означает конъюнкцию двух ФП ( $\mu_1 \wedge \mu_2$ ), сплошная линия - дизъюнкцию двух ФП ( $\mu_1 \vee \mu_2$ ). Операции усреднения и объединения ФМ  $A_1$  и  $A_2$  двух разных переменных  $x_1$  и  $x_2$  выполняются в каждый фиксированный момент времени  $t_i$  также по принципам минимума и максимума (рисунок 3.1,б). Аналогичные операции могут применяться и для большего числа ФМ и переменных.

Приведенные выше операции позволяют принять одно определенное значение функции принадлежности в зоне взаимного перекрытия фаззи-множеств. Это дает основание для принятия определенного решения и относительно значения выходной переменной  $y$ , являющейся управляющим воздействием в системе с фаззи-управлением.

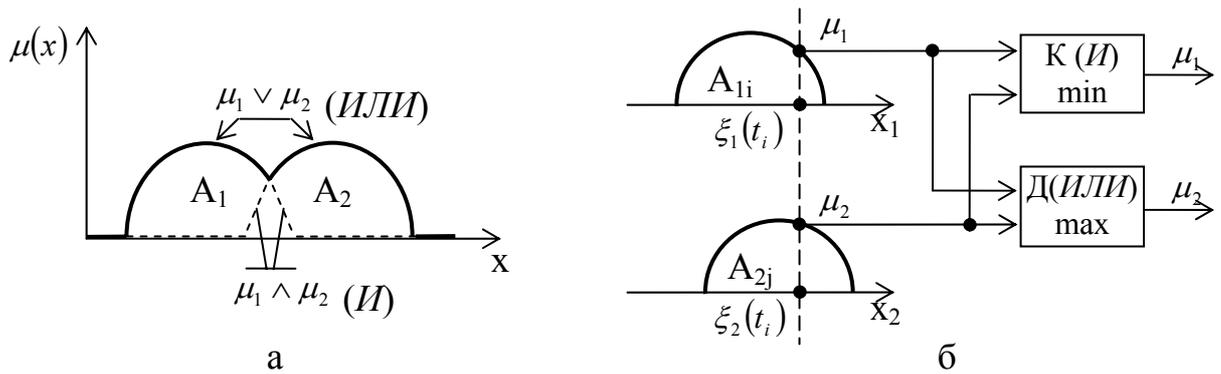


Рисунок 3.1- Операции усреднения (И) и объединения (ИЛИ) фаззи-логики для одной переменной (а) и для двух разных переменных (б)

#### 4 Структура и алгоритм фаззи-управления

Как и в любой традиционной системе, в системе фаззи-управления можно выделить управляющую часть - систему управления, воздействующую на объект управления. Собственно система фаззи-управления состоит из четырех блоков [2], выполняющих последовательно в три этапа процедуру формирования алгоритма управления как функции управляющих воздействий  $y$  от входных переменных  $x_1, x_2, x_n$  (рисунок 4.1).

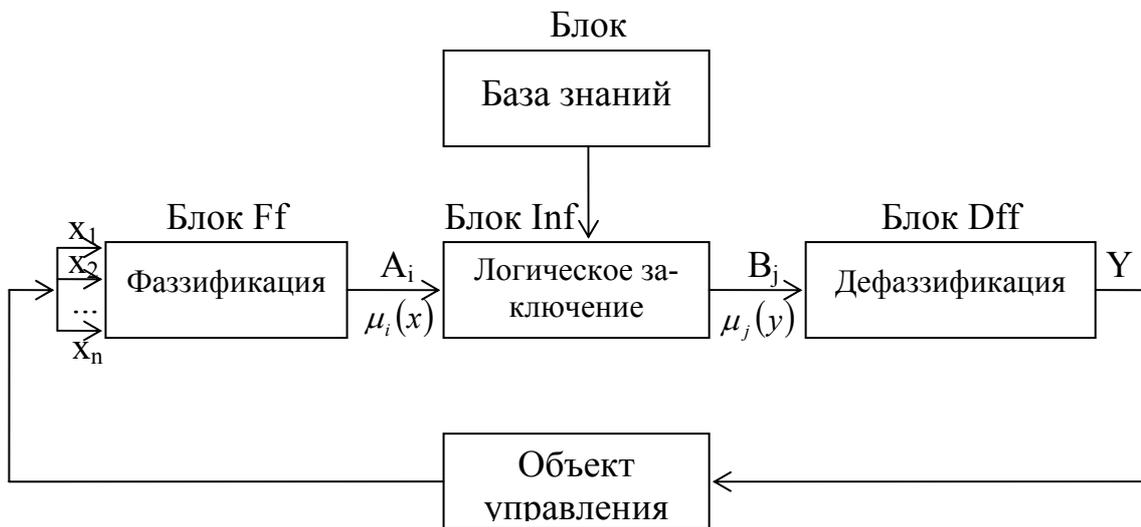


Рисунок 4.1- Блочная структура системы фаззи-управления для одного управляющего воздействия

Записи, определяющие взаимосвязь входных и выходных переменных функций фаззи-логики, называются правилами. Набор правил является алгоритмом фаззи-управления.

Блок фаззификации (Ff) преобразует входные физические переменные ( $x_1, x_2, x_n$ ) в термы  $A_i$ - лингвистических переменных и выделяет для каждого момента времени (или для каждого временного такта) значения ФП  $\mu_i(x)$  для активизированных правил.

Блок логического заключения (Inf) в соответствии с правилами, заложенными предварительно экспертом в блок базы знаний (RAM), определяет термы  $B_j$ , выходной лингвистической переменной и присваивает им согласно принципам ФЛ значения функции принадлежности  $\mu_j(y)$ .

Блок дефаззификации (Dff) преобразует термы  $B_j$  в управляющий сигнал  $u$ . Если фаззи-устройство (ФУ) должно вырабатывать несколько управляющих воздействий, то такое многоканальное ФУ можно рассматривать как несколько параллельно работающих ФУ.

Рассмотрим вопрос формирования алгоритма фаззи-управления в приведенной на рисунке 4.1 структуре фаззи-управления.

Основу алгоритма составляет свод правил, который находится в блоке базы знаний. Для  $n$  входных переменных, каждая из которых имеет  $m$  термов, максимальное число правил  $m^n$ . Правила составляются специалистом-экспертом на основании его понимания задачи управления.

Если объект управления имеет полное математическое описание, то за основу может быть принят найденный линейный алгоритм, решающий заданную задачу управления линеаризованным объектом. Соответствующие найденному алгоритму правила проверяются (экспериментально или расчетно) и при необходимости корректируются.

Правила составляются с учетом следующих рекомендаций:

- свод правил должен быть достаточно полным для выполнения поставленной задачи управления, не должно быть неучтенных возможных ситуаций с измеряемыми координатами, уводящих процесс из-под контроля;

- желательно, чтобы каждое правило было простым, содержало одно условие и одно заключение;

- для получения более качественного процесса управления не должно оставаться не перекрытых фаззи-множеств хотя бы двумя правилами;

- чем разнообразнее тестовые сигналы в процессе составления алгоритма, тем менее чувствительную к появлению в условиях эксплуатации непредусмотренных возмущающих воздействий систему можно получить.

Дополнительно к своду правил в состав алгоритма входят функции принадлежности, определяющие количественную взаимосвязь физических переменных с лингвистическими, т.е. с термами. Для простоты математического описания ФП представляются обычно в треугольной или трапецеидальной форме. Важными количественными показателями являются значения левой ( $a$ ) и правой ( $b$ ) границ, а также центра ( $c$ ) ФП. Число ФП, приходящихся на каждую физическую переменную, выбирают из соображений качества управления. С увеличением числа ФП качество управления повышается, однако при этом усложняется алгоритм и повышаются требования к его быстродействию. Практика построения систем с фаззи-управлением показал [5], что трех-пяти ФП для каждой входной переменной и пяти-семи ФП для выходной переменной оказывается достаточно для приемлемого качества решения задач управления в электротехнике.

Реализация алгоритма управления в регулируемых электротехнических системах возлагается на фаззи-регулятор (ФР).

## **5 Пример использования фаззи-регуляторов в позиционных электроприводах**

Рассмотрим общий подход к синтезу алгоритма фаззи-управления в виде методики синтеза ФР для выделенного класса позиционных электроприводов (ПЭП), применяемых в теплосетях и в системах водоснабжения [5]. В состав методики входит совокупность рекомендаций по составлению таблицы правил и определению параметров функций принадлежности для всех входных и выходных переменных. Процедура синтеза выполняется по этапам, шаг за шагом, как это показано на блок - схеме построения алгоритма (рисунок 5.1). Конечной формой алгоритма ФР является зависимость физического выходного управляющего воздействия от физических входных переменных.

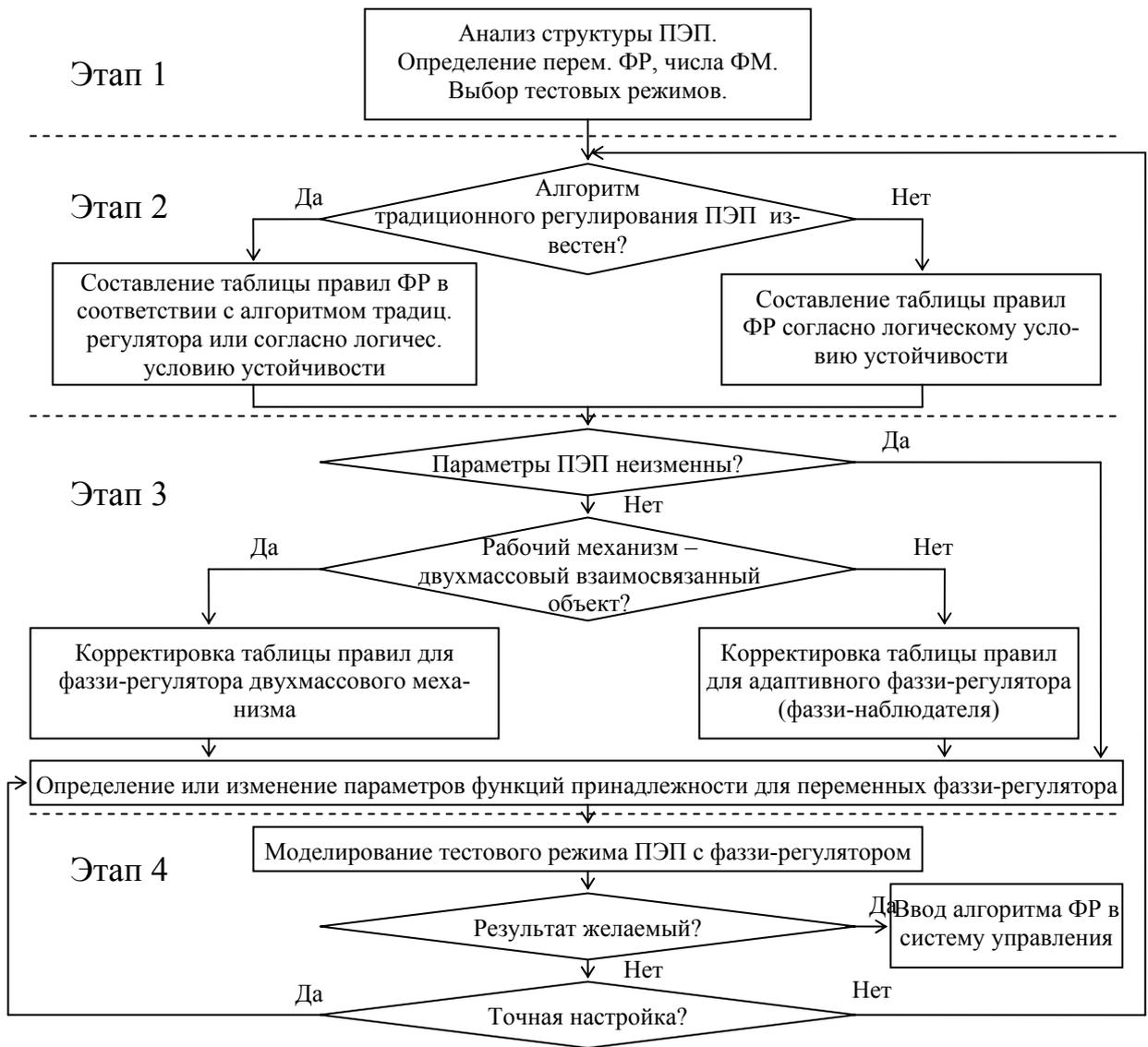


Рисунок 5.1 - Блок-схема построения алгоритма фаззи-управления

Структурная схема ПЭП с фаззи-управлением показана на рисунке 5.2.

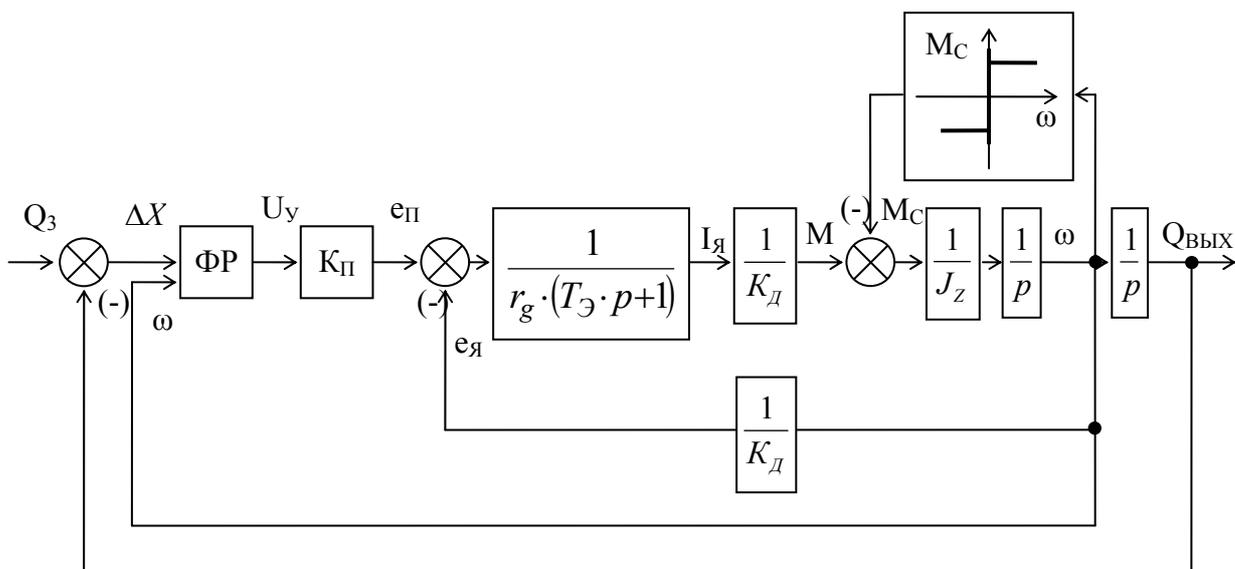


Рисунок 5.2 - Структурная схема ПЭП

В качестве входных переменных фаззи-регулятора ФР используются сигналы рассогласования и скорости вращения (первая производная от рассогласования) двигателя. Стратегия управления фаззи-регулятора закладывается в таблице правил. Предварительно необходимо определить число фаззи-множеств, описывающих каждую переменную ФР. Как уже отмечалось, на практике оказывается достаточным: 5-ти ФМ для входных переменных и 7-ми ФМ для выходной переменной. Соответствующие им функции принадлежности приведены на рисунке 5.3.

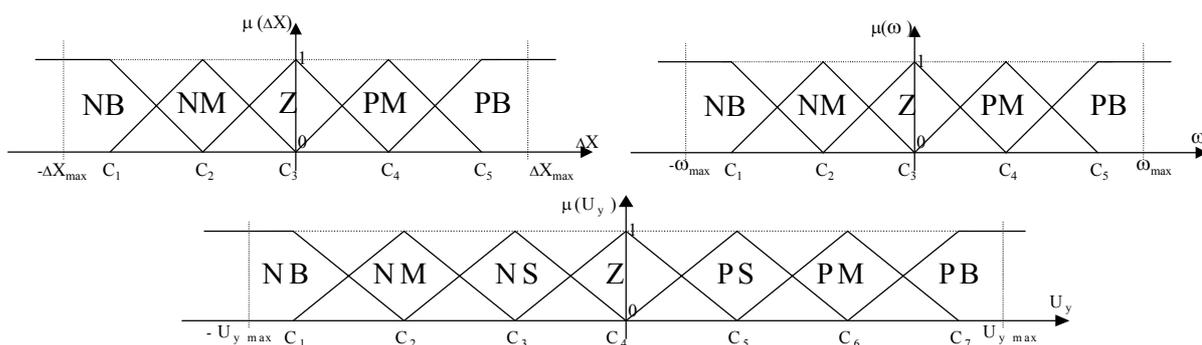


Рисунок 5.3

При заполнении таблицы правил пользуются уже синтезированным традиционным регулятором положения. Выбирают ту область таблицы правил, в которой одна из входных переменных равна нулю (задействовано только „нулевое”

фаззи-множество) и симметрично расставляют названия фаззи-множеств выходной переменной. Первыми заполняются центральные строка и столбец таблицы правил (рисунок 5.4). Далее заполняются оставшиеся клетки таблицы, как суммарное воздействие соседних (с этой клеткой) фаззи-множеств (например, сумма  $PS+PS=PM$ ).

	NB	NM	Z	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	Z
NM	PB	PM	PS	Z	NS
Z	PM	PS	Z	NS	NM
PM	PS	Z	NS	NM	NB
PB	Z	NS	NM	NB	NB

Рисунок 5.4

	NB	NM	Z	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	Z
NM	PB	PB	PM	Z	NS
Z	PM	PM	Z	NM	NM
PM	PS	Z	NM	NB	NB
PB	Z	NS	NM	NB	NB

Рисунок 5.5

Оптимальные коэффициенты  $C_1, C_2, \dots, C_n$  для каждой переменной определяются итерационным методом (методом проб и проверок) в процессе моделирования.

Возникновение ошибки позиционирования связано с наличием в системе момента сопротивления  $M_c$ . При подходе рабочего органа РО к позиции остановки, когда рассогласование ( $\Delta X = \Delta Q$ ) еще велико, скорость становится уже мала, и РО останавливается, не доходя до заданного уровня остановки (в соответствии с той таблицей правил, которая составлена).

Для дополнительного снижения ошибки можно использовать дополнительный ФР. Теперь получаем систему с двумя ФР, при этом второй ФР будет работать только в зоне остановки с дополнительным правилом:

при подходе к установившемуся значению перемещения, когда рассогласование еще „велико”, а скорость уже „мала”, дать дополнительное управляющее воздействие. Вне зоны „велико” и при скоростях достаточно „больших”, дополнительное управляющее воздействие не требуется. Выходы с обоих фаззи-регуляторов подаются на блок максимизации, на выходе которого выделяется управляющий сигнал.

Возможно объединение на уровне алгоритмов двух ФР в один путем учета всех задействованных выходных фаззи-множеств, с последующей корректировкой центров функций принадлежности. Составленная таблица объединенного ФР приведена на рисунке 5.5.

Нелинейный алгоритм управления объединенного фаззи-регулятора в графической форме как функция двух физических переменных представлен на рисунке 5.6.

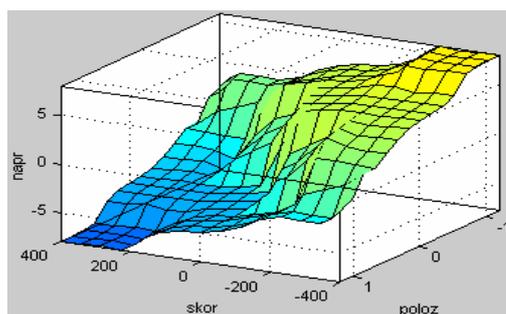


Рисунок 5.6 - Графическое представление алгоритма управления

## **6 Пример использования фаззи-регуляторов в электроприводах подъемно-транспортных механизмов**

Интересна область применения фаззи-управления для позиционных электроприводов некоторых подъемно-транспортных механизмов [2,4], роботов и манипуляторов, работающих в автоматических режимах. Позиционирование рабочего органа в таких электроприводах выполняет либо чисто транспортные функции (например, перемещение подвешенного груза), либо по окончании позиционирования выполняется некоторая технологическая операция (например, сверление или сварка). Особенность данной группы ПЭП – изменение момента нагрузки и момента инерции при переходе от одного позиционирования к другому, а в некоторых механизмах и в процессе одного позиционирования.

Для ПЭП механизма с маятниковой подвеской рабочего органа решается комплексная задача обеспечения точного позиционирования механизма в заданное технологией положение в сочетании с демпфированием колебаний раскачи-

вающегося груза при условии произвольной формы и величины заданного перемещения. На практике данная задача решается в режиме ручного управления опытным оператором (крановщиком) на основе приобретенного им опыта работы.

Расчетная модель электропривода данного механизма с большими углами отклонения РО, представляющего собой сложную нелинейную систему, позволяет исследовать динамические режимы работы привода.

Структурная схема ПЭП с демпфирующими регуляторами показана на рисунке 6.1.

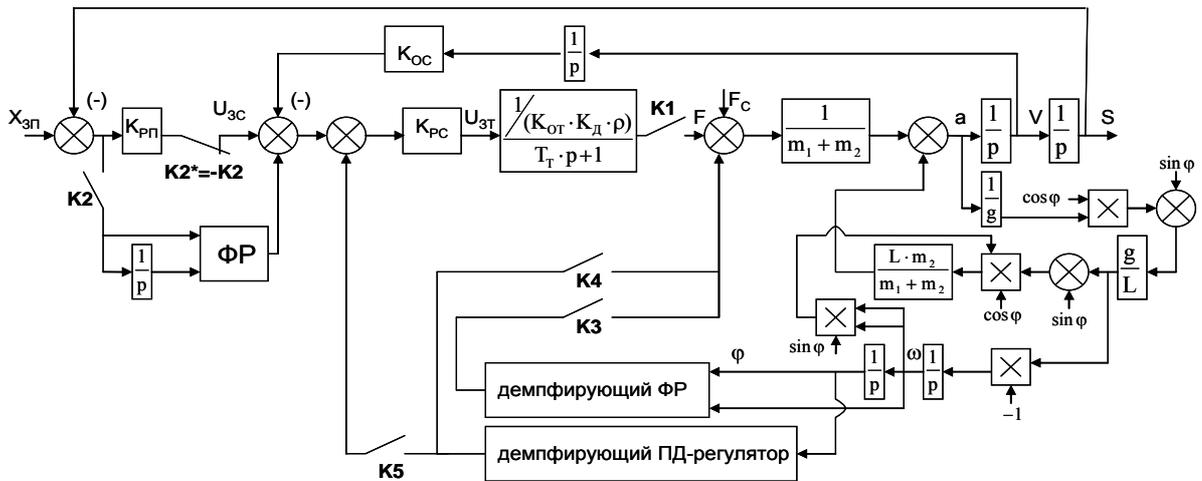


Рисунок 6.1

Логический закон устойчивости, по которому синтезируется демпфирующий фаззи-регулятор, содержит правила:

Если знаки угла отклонения маятника и скорости отклонения угла маятника одинаковы, то маятник удаляется от положения равновесия, и требуется дать управляющее воздействие того же знака (т.е. переместить механизм в направлении отклонения маятника).

Если знаки угла отклонения маятника и скорости отклонения угла маятника противоположны, то требуется дать нулевое или небольшое управляющее воздействие, уменьшающее отклонение.

Если угол отклонения маятника равен нулю и скорость отклонения угла маятника равна нулю, то маятник находится в положении равновесия, и управляющего воздействия не требуется.

При исследовании процесса демпфирования механической части входное воздействие  $F_y$  прикладывается к опорной тележке (рисунок 6.1, ключ К1 разомкнут).

Таблица правил, соответствующая данному закону, имеет вид (рисунок 6.2):

	N B	N M	Z	P M	P B
N B	N B	N B	N M	N S	Z
N M	N B	N M	N S	Z	P S
Z	N M	N S	Z	P S	P M
P M	N S	Z	P S	P M	P B
P B	Z	P S	P M	P B	P B

Рисунок 6.2

Данное позиционирование обеспечивает эффективное демпфирование колебаний рабочего органа и приемлемую точность остановки, но требуется ряд коммутаций в цепях управления и в силовой цепи.

Одновременного выполняется как точное позиционирование механизма, так и демпфирование колебаний раскачивающегося груза.

Если скоро используется для верхнего и нижнего уровня управления фаззи-контроллер, то экономически целесообразно применить комбинацию: основной фаззи-регулятор в прямом канале управления и демпфирующий ФР в цепи обратной связи (рисунок 6.1, ключи К1, К2, К3 замкнуты). Тогда, на одном фаззи-контроллере удастся реализовать три функции управления:

- формирование технологического задания на перемещение;
- обеспечение точной отработки механизмом заданного перемещения;
- одновременное демпфирование колебаний маятниковой подвесы.

Однако, данная задача оказывается весьма сложной для системы автоматического управления, так как алгоритм устранения колебаний маятника может входить в противоречие с алгоритмом точной остановки.

Таким образом, можно сделать вывод [5]: эффективным средством точного позиционирования при одновременном демпфировании колебаний в сложной

двухмассовой системе является применение в цепи управления перемещением тележки фаззи-регулятора, который позволяет устранить ошибку позиционирования, в сочетании с демпфирующим традиционным или фаззи-регулятором в цепи обратной связи. Замена ПД-регулятора на фаззи-регулятор придаст системе управления меньшую чувствительность к изменению параметров электропривода.

## 7 Использование фаззи-управления в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе

В последние годы частотно-регулируемый асинхронный электропривод с векторным управлением и косвенным определением положения поля (Indirect Field Oriented Control – IFOC) находит множество применений [3]. Обобщенная блок-схема такой системы привода с контуром регулирования скорости показана на рисунке 7.1.

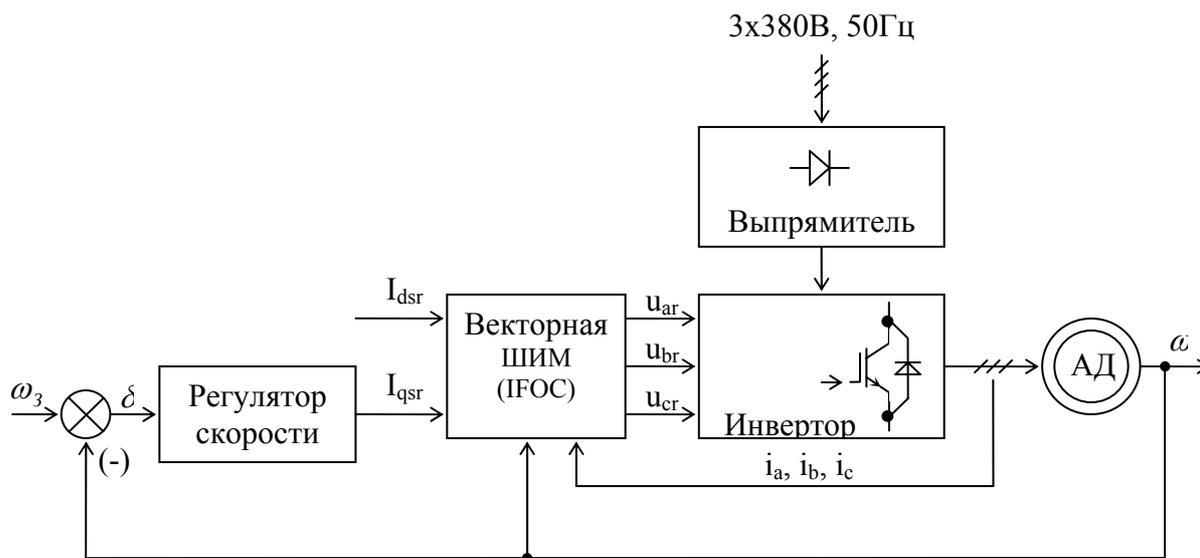


Рисунок 7.1 - Блок-схема электропривода

Рабочие алгоритмы в такой системе основываются на анализе проекций вектора тока статора в осях  $d - q$ , вращающихся синхронно с вектором потока сцепления ротора. В этих координатах независимо рассматриваются две составляющие тока статора: реактивная  $I_{dsr}$ , которая определяет магнитный поток, и активная  $I_{qsr}$ , которая определяет момент.

Как правило, такие электроприводы должны обладать хорошей управляемостью и низкой чувствительностью к возможным вариациям (неопределенно-

стям) параметров электромеханической системы. Обычной причиной неопределенностей являются изменения параметров под действием внешних факторов и проявления нелинейности в динамическом режиме работы самого двигателя привода.

Для требуемого управления скоростью в системах асинхронного привода с косвенным определением вектора потока и ориентацией по полю традиционно используется ПИД - регулятор скорости. Однако при такой структуре характеристики системы оказываются очень чувствительными к изменениям значений параметров, и неточности определения параметров существенно отражаются на характеристиках электропривода.

В подобных электроприводах может быть эффективным применение регуляторов на базе фаззи-логики, благодаря их способности обеспечивать требуемые характеристики электропривода в условиях неопределенности параметров. Наилучшие результаты от применения фаззи-логики при управлении скоростью в асинхронном приводе с косвенной ориентацией по полю могут быть получены при использовании фаззи-регулятора с семью функциями принадлежности выходной координаты системы управления. Опыт эксплуатации подобных электроприводов показал, что этот регулятор имеет низкую чувствительность к неопределенности параметров электромеханической системы и обеспечивает лучшие характеристики по сравнению с ПИД - регулятором в условиях регулирования скорости при внешних возмущениях и вариации параметров привода. Пример структуры фаззи-регулятора скорости показан на рисунке 7.2.

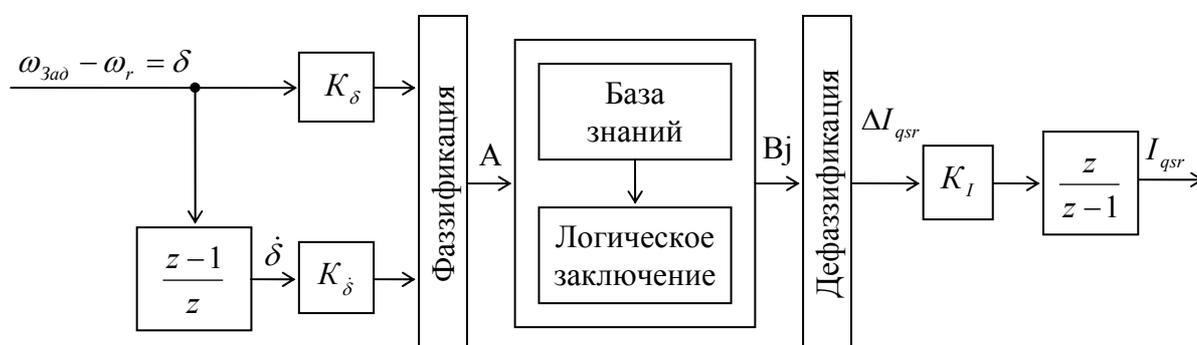


Рисунок 7.2 - Блок-схема фаззи-регулятора скорости

На входы фаззи-регулятора подаются масштабированные значения ошибки по скорости и изменения ошибки по скорости за один шаг работы регулятора. Выходом фаззи-регулятора является изменение задания активного тока за один шаг работы регулятора. Коэффициенты усиления  $K_s$ ,  $K_{\dot{s}}$ ,  $K_I$  могут быть изменены при настройке фаззи-регулятора на желаемую характеристику.

Регулятор с такой структурой характеризуется значительными затратами времени на вычисления. Даже при использовании специализированного DSP-микроконтроллера полный цикл выполнения расчетных алгоритмов ИФОС с фаззи-регулятором скорости занимает более 100 мкс. Это приводит к ограничению верхнего предела выходной частоты инвертора на уровне 3-5 кГц, что не всегда достаточно для удовлетворения требований современной практики частотно-регулируемого привода, когда требуются частоты до 10 кГц и выше.

Являются актуальными поиски решений, позволяющих повысить быстродействие фаззи-регулятора без снижения эффективности его характеристик. Можно отметить, что упрощение структуры фаззи-регулятора путем простого снижения числа функций принадлежности с семи до пяти не дает удовлетворительного результата, так как получаемые в этом случае характеристики электропривода не являются удовлетворительными.

## **8 Автоматическая настройка параметров регулятора скорости с использованием фаззи-логики**

Нестационарность характеристик электроприводов при работе механизмов зависит от способов управления электродвигателями постоянного и переменного тока и от свойств механизмов в процессе эксплуатации. Изменение параметров силового канала привода происходит вследствие изменения следующих основных величин:

- параметров электромагнитных контуров в системе «преобразователь - двигатель»;
- передаточных коэффициентов преобразователей;

- потока возбуждения двигателей при двухзонном регулировании скорости;
- моментов инерции механизмов;
- значительных изменений по составу и интенсивности возмущающих и управляющих воздействий.

Все перечисленное может приводить к существенному увеличению динамических ошибок в электроприводе и необходимости перенастройки параметров для минимизации этих ошибок.

Известны [7,8] традиционные методы адаптации параметров регуляторов скорости и тока тиристорных электроприводов постоянного тока (коэффициента передачи регулятора скорости в функции нагрузки, постоянной времени ПИ-регуляторов скорости и тока в функции скорости).

Неотъемлемой составной частью современных систем электропривода на базе микропроцессорных контроллеров является функция автоматической настройки регуляторов. Однако, как показывает опыт работы с промышленными системами электропривода, существующие технические решения программными средствами еще далеки от совершенства. Так, например [9], при использовании электрических преобразователей «SIMOREG K» фирмы «Сименс» в электроприводе промышленного робота (манипулятора) не удается реализовать автоматическую настройку регулятора скорости привода в условиях реального момента нагрузки механизма поворота.

Представляет интерес применение для целей автоматической настройки параметров регулятора скорости электропривода на стадии математической модели принципов фаззи-логики [9]. Реализация настройки регулятора на основе фаззи-логики по сравнению с настройкой на основе идентификации параметров объекта регулирования характеризуется существенно меньшими затратами вычислительных ресурсов контроллеров и не требует использования математического описания объекта регулирования.

Применительно к рисунку 7.1 регулятор скорости обладает структурой ПИ-регулятора или представляет собой дискретный пропорционально-интегральный регулятор с фильтром на входе, который используется во многих приводах, в том числе и в приводах фирмы «Сименс».

В процессе автоматической настройки параметров регулятора скорости необходимо сформировать значения коэффициентов пропорциональной ( $K_p$ ) и интегральной ( $K_i$ ) составляющих регулятора, исходя из желаемых динамических характеристик процесса регулирования скорости электропривода, которые, в свою очередь, определяются основными показателями качества регулирования:

- перерегулирование  $\sigma$ ;
- показатель демпфирования процесса  $\zeta$ .

Для реализации процесса автоматической перестройки параметров регулятора скорости на основе фаззи-логики, настроенного на технический оптимум (ТО), в качестве входных фаззи-переменных адаптивного блока, содержащего дополнительные фаззи-регуляторы параметров, выбираются расчетные значения коэффициентов  $\sigma$  и  $\zeta$ . В процессе фаззификации этих переменных выделяют термы  $A_\sigma$  и  $A_\zeta$ , функции принадлежности которых  $\mu_\sigma$  и  $\mu_\zeta$  могут быть приняты в форме трапеций. Логическое заключение (инференция) значений функций принадлежности целесообразно осуществить на основе принципа усреднения (И), т.е. результирующая функция принадлежности вычисляется как [9]:

$$\mu_{\sigma\zeta[ij]} = \mu_{\sigma[i]} \cdot \mu_{\zeta[j]}.$$

При дефаззификации термов  $V_{Kp}$ ,  $V_{Ki}$  корректировок коэффициентов  $K_p$  и  $K_i$  выделяются численные значения корректировок пропорциональной и интегральной составляющих цифрового регулятора скорости привода.

## 9 Реализация фаззи-управления

Фаззи-регулятор, реализующий составленный экспертом алгоритм, может быть выполнен одним из трех способов [4]:

- аппаратным;
- аппаратно-программным;
- программным.

Аппаратный фаззи-регулятор, выполняемый на дискретных и аналоговых микросхемах, разрабатывается в основном японскими фирмами на начальном этапе развития фаззи-управления и его применения в некоторых электротехнических устройствах. Достоинства аппаратного фаззи-регулятора – его высокое бы-

стродействие из-за параллельного принципа действия. Обработка одного правила в данном типе фаззи-регулятора на базе микросхем СБИС занимает около 100нс, т.е. может быть обработано 10 млн. операций за 1с (например, фаззи-контроллер FUZ M1 фирмы “Omron”). Недостатком аппаратного выполнения фаззи-регулятора является большое количество микросхем, что повышает его стоимость, а также отсутствие гибкости в управлении, т.е. невозможность без аппаратных средств изменять алгоритм управления. Поэтому вместо аппаратного объектно-ориентированного фаззи-регулятора на практике находят все большее применение более универсальных аппаратно-программный фаззи-регулятор.

Аппаратно-программный фаззи-регулятор, называемый фаззи-контроллером (FC) имеет в своем составе аналоговые параллельные вычислители, а также другие микросхемы – фаззи-чипы (Fuzzy-Chips) – отлитые в кристалле элементы фаззи-логики, которые обеспечивают высокое быстродействие. Аппаратно в FC могут выполняться на фаззи-чипах операции фаззификации и дефаззификации, а программно на основе микроконтроллера обрабатываются правила, хранящиеся в памяти контроллера. Применяемое программирование маскированием позволяет устанавливать необходимый алгоритм управления. Быстродействие FC уступает быстродействию аппаратного фаззи-регулятора и составляет около 35 мкс на обработку одного правила (FC 110 фирмы “Togai” с процессором 80386 с частотой 10 МГц). Такое быстродействие FC свойственно разработкам 90-х годов. С появлением процессоров нового поколения быстродействие FC существенно возрастает. Выполняется FC ограниченно универсальным с конечным числом входов, выходов и правил. Они находят применение для управления в различных технических системах, в том числе в некоторых транспортных установках, в бытовых машинах и приборах. Пример FC этого типа - контроллер типа Quantum.

Программный фаззи-регулятор выполняется на базе персонального компьютера (PC) с необходимым интерфейсом. Такой фаззи-регулятор может рассматриваться как полностью универсальный фаззи-контроллер с произвольным числом входов, выходов и правил, он позволяет сформировать любой алгоритм. Быстродействие программного фаззи-регулятора определяется временными возможностями собственно компьютера PC и его интерфейса. Данный фаззи-

регулятор, превосходя FC по универсальности, уступает ему по быстродействию. Представляется целесообразным и перспективным использование программного фаззи-регулятора в тех технических системах, которые ориентированы на применение программного способа управления с цифровой ЭВМ.

Таким образом, на современной стадии развития техники реализовать фаззи-управление можно:

- а) используя готовый фаззи-контроллер;
- б) используя универсальный контроллер, путем написания программы реализации алгоритмов фаззи-управления на языке высокого уровня или внутреннем языке программирования контроллера.

Одним из важных достоинств современных контроллеров является многоканальность, т.е. наличие многих входов и выходов, а следовательно, появляется возможность совмещения верхнего и нижнего уровня фаззи-управления на одной материальной базе (на одном контроллере), что в свою очередь приводит к экономии финансовых средств, затрачиваемых на реализацию данной системы управления, а также к упрощению эксплуатации и перенастройки системы управления при изменении управляемого технологического процесса.

Примером фаззи-контроллера [5] является контроллер типа Quantum (программная оболочка Concept). Внешний вид контроллера представлен на рисунке 9.1.



Рисунок 9.1 - Внешний вид контроллера Quantum

Обмен данными между верхним и нижним уровнем фаззи-управления осуществляется внутри фаззи-контроллера через адресные ячейки памяти.

Контроллер Quantum имеет модульную конструкцию:

- модуль центрального процессорного устройства (ЦПУ) – сердце контроллера, осуществляет хранение информации, обработку операций, передачу данных в соответствии с загруженной в него программой;

- модуль аналогового или цифрового ввода – осуществляет прием значений входных сигналов контроллера;

- модуль аналогового или цифрового вывода – осуществляет вывод значений управляющего воздействия (выходного сигнала), рассчитанных в ЦПУ;

- модуль питания– дополнительный внешний источник питания;

- слот соединения блоков (соединительная карта) – предназначен для соединения блоков и обеспечения взаимосвязи между ними.

Широкое использование данного контроллера объясняется:

- достаточной простотой программирования алгоритмов фаззи-регулятора и согласованностью с современным способом моделирования систем с фаззи-управлением;

- выходной многоканальностью, позволяющей выполнять разные уровни управления;

- наличием ряда внутренних языков программирования, которые просты и удобны в изучении и использовании.

Для написания программы фаззи-управления для позиционных электроприводов пользуются внутренним блочным языком программирования в среде Concept (язык контроллера Quantum).

## Список использованных источников

1 Усков, А.А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика / А.А. Усков, А.В. Кузьмин. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2004.

2 Терехов, В.М. Системы управления электроприводов / В.М.Терехов, О.И.Осипов. - М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304с.

3 Брадаи, Р.И. Повышение эффективности регулятора скорости частотно-регулируемого электропривода средствами искусственного интеллекта / Брадаи Р.И. – Электротехника. - 2008.- №12. – С. 41-50.

4 Электротехнический справочник: В 4т. Т.4: Использование электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г.Герасимова [и др.]; гл. ред. А.И.Попов. – 8-е изд. испр. и доп. – М.: Изд. МЭИ, 2002. – 696с.

5 Постников, В.Г. Оптимизация позиционных электроприводов автоматизированных систем на основе фаззи-контроллера: автореферат диссертации / В.Г.Постников. - М.: Полиграф. центр МЭИ, 2007.

6 Нечеткая логика – математические основы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [WWW.URL: http://www. basegroup.ru /](http://www.basegroup.ru/).

7 Комплектный электропривод подачи серии «Мезоматик -К». Техническое описание. [Б.М.], 1988. – 54с.

8 Комплектный электропривод подачи серии «Кемрон». Техническое описание. [Б.М.], 1989. – 63с.

9 Старостин, С.С. Автоматическая настройка регулятора скорости электропривода на основе фаззи-логики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [WWW.URL: http://www.library.ospu.odessa.ua/](http://www.library.ospu.odessa.ua/).