

**Н. Е. Жадобин,**  
д-р техн. наук, профессор,  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

**А. И. Лебедев,**  
канд. техн. наук, доцент,  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

**О. Г. Данилов,**  
аспирант кафедры электродвижения и автоматики судов,  
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

## НЕЧЕТКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

### FUZZY CONTROL OF DYNAMIC SYSTEMS

*Применение технологии нечеткой логики, ориентированной на обработку логико-лингвистических моделей представления знаний, открывает широкие перспективы для создания интеллектуальных систем управления сложными динамическими объектами, действующих в условиях неполной информации.*

*Application of technology of the fuzzy logic focused on processing of logic-linguistic models of representation of knowledges opens wide prospects for creation of intellectual control systems of complex dynamic objects operating in the conditions of incomplete information.*

*Ключевые слова: интеллектуальные системы управления, нечеткие регуляторы, технологии нечеткой логики, Fuzzy-управление, фаззификация.*

*Key words: fuzzy logic, fuzzy regulators, intelligent control systems, fuzzy control, fuzzy controller.*

**О**ДНОЙ из наиболее важных проблем, возникающих при создании и эксплуатации технических систем, является обеспечение требуемого качества и надежности управления в условиях возмущающих факторов, к которым относятся изменения параметров измеряемого процесса и среды функционирования системы. Оптимальное, без перегрузки и с наилучшими технико-экономическими показателями, управление судовыми энергетическими установками возможно только при измерении их фактической нагрузки.

Широкое внедрение микропроцессоров в судовые системы контроля и управления вызвало рост потребности в надежных и точных системах измерения. Электронное управление судовыми дизельными энергетическими установками существенно расширяет возможности повышения уровня автоматизации управления судовым силовым оборудованием.

Главным средством, обеспечивающим автоматизированное управление режимами работы дизельной установки, является электронный регулятор частоты вращения, обладающий, в отличие от механических или гидромеханических регуляторов, повышенной гибкостью управления дозированием топлива. Электронные регуляторы применяются для регулирования частоты вращения дизеля и используются для оптимизации подачи топлива на каждом режиме работы, включая переходные процессы. Один и тот же регулятор путем незначительных изменений может быть использован не только для регулирования частоты вращения, но и для любой другой физической величины.

Многие параметры судовой энергетической системы зависят от внешних условий: волнения моря, направления и силы ветра, состояния корпуса судна, что вносит значительную погрешность в системы контроля. Для управления сложными динамическими объектами используются методы и технологии искусственного интеллекта как средства борьбы с неопределенностью внешней

среды. В интеллектуальных регуляторах наибольшее распространение получили технологии нечеткой логики.

Теория нечетких множеств и основанная на ней логика позволяют описывать неточные категории, представления и знания, оперировать ими и делать соответствующие заключения и выводы. Наличие таких возможностей для формирования моделей различных объектов, процессов и явлений на качественном, понятийном уровне определяет интерес к организации интеллектуального управления на основе применения методов нечеткой логики. Данный метод обеспечивает принципиально новый подход к проектированию систем управления, «прорыв» в новые информационные технологии, гарантирует возможность решения широкого круга проблем, в которых данные цели и ограничения являются слишком сложными или плохо определенными и в силу этого не поддаются точному математическому описанию.

Возможны различные ситуации, в которых могут использоваться нечеткие модели динамических систем:

— когда имеется некоторое лингвистическое описание, отражающее качественное понимание (представление) процесса и позволяющее непосредственно построить множество нечетких логических правил;

— имеются известные уравнения, которые (хотя бы грубо) описывают поведение управляемого процесса, но параметры этих уравнений не могут быть точно идентифицированы;

— когда известные уравнения, описывающие процесс, являются слишком сложными, но могут быть интерпретированы нечетким образом для построения лингвистической модели. Нечеткое управление (Fuzzy Control, Fuzzy-управление) в настоящее время является одной из перспективнейших интеллектуальных технологий, позволяющих создавать высококачественные системы управления (СУ).

Среди причин распространения Fuzzy-управления обычно выделяют следующие:

1) особые качества СУ с нечеткой логикой, в частности малая чувствительность к изменению параметров ОУ;

2) синтез СУ с нечеткой логикой при применении современных средств аппаратной и программной поддержки зачастую проще, чем традиционных.

Как и у любых СУ, у систем с нечеткой логикой существует область, в которой их применение является наиболее предпочтительным. В качестве таких областей обычно выделяют следующие:

— системы регулирования, для которых модель ОУ определена лишь качественно;

— надстройка над традиционными системами регулирования (ПИД-регуляторами) для придания им адаптивных свойств;

— воспроизведение действий человека-оператора;

— системы организационного управления верхнего уровня.

Основным признаком классификации нечетких СУ является место нахождения блоков нечеткого логического вывода в СУ: либо нечеткая система сама формирует управляющие сигналы, либо сигналы с нечеткой системой управляют параметрами традиционной СУ (например, с ПИД-контроллером). К последним также относятся системы с так называемыми нечеткими комплексными моделями, в которых математическое описание объекта или контроллера представлено ансамблем традиционных моделей (обычно линейных), а переход между данными моделями (либо главный, либо скачкообразный) происходит посредством сигналов с блоков нечеткого вывода.

СУ с нечеткой логикой можно разделить также на неадаптивные и адаптивные. В неадаптивных база знаний после проектирования и настройки системы остается неизменной. В адаптивных база знаний подстраивается в процессе работы в зависимости от складывающейся в процессе управления ситуации.

Независимо от того, адаптивной или нет является нечеткая СУ, основным вопросом при ее проектировании является формирование базы знаний в виде нечетких продукционных правил.

Основным методом здесь является заимствование знаний специалистов по управлению рас-

смаатриваемым объектом. Основным методом синтеза СУ с нечеткой логикой, как и в первых моделях нечетких регуляторов, по-прежнему остаются эмпирический синтез набора нечетких продукционных правил базы знаний и выбор алгоритма нечеткого вывода с последующей настройкой параметров системы на реальном ОУ или его модели путем имитационного моделирования различных режимов работы.

В общем случае структура управления СУ с нечетким регулятором представлена на рис. 1.

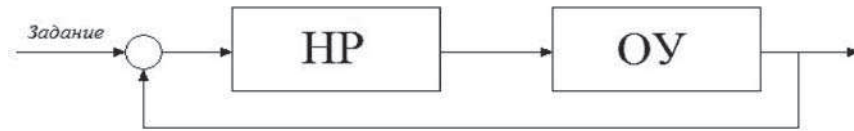


Рис. 1. Структура системы управления с нечетким регулятором

Как и в классической теории управления, нечеткое регулирование осуществляется путем оценки сигнала ошибки регулирования и выдачи управляющего воздействия на объект управления.

Для структуры, представленной на рис. 1, для двух входных сигналов, применяя аппарат нечеткой логики, получим лингвистические переменные  $x, y, z$ , качественно оценивающие входные ( $x, y$ ) и выходной ( $z$ ) сигналы регулятора. Для каждой лингвистической переменной необходимо определить множество терминов и область определения этих переменных, что входит в процесс настройки регулятора.

Основной же задачей синтеза нечеткого регулятора является заполнение его базы знаний, которая устанавливает качественную взаимосвязь между входной и выходной величинами. Принцип функционирования нечеткого регулятора представлен на рис. 2.

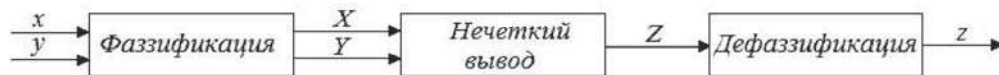


Рис. 2. Принцип функционирования нечеткого регулятора

Здесь  $x, y, z$ , и  $X, Y, Z$  соответственно четкие и нечеткие значения входных и выходных сигналов. Входные сигналы  $x$  и  $y$  проходят этап фаззификации, инициализируя нечеткие множества  $X$  и  $Y$  путем перевода их четких значений с помощью функций принадлежности в нечеткие.

Нечеткое множество определяется путем нечеткого логического вывода, основанного на наборе правил, хранящихся в базе знаний нечеткого регулятора. С помощью процесса агрегации (нечеткого вывода) получаем выходное нечеткое множество  $Z$ . Четкий сигнал выхода формируется с помощью процедуры дефаззификации — перевода нечеткого значения  $Z$  в четкое  $z$ .

Нечеткий логический регулятор (НЛР) представляет собой корректирующее устройство, предназначенное для выработки управляющего сигнала объекта управления путем преобразования четких входных переменных в лингвистические, обработки базы знаний и обратных преобразований нечетких значений в четкие. От структуры НЛР, его места расположения в регулируемом канале СУ зависят как функциональные возможности системы, так и статические и динамические характеристики.

Структурную реализацию НЛР можно представить в виде:

- корректирующего устройства для обычного, аппаратно реализуемого П-, ПИ-, ПИД-регулятора. При этом нечеткий корректор может быть подключен к обычному регулятору как последовательно, так и параллельно. Возможен вариант включения нечеткого корректирующего устройства для настройки параметров обычного регулятора с целью обеспечения требуемого оптимума характеристик технологического процесса реализуемой ИСУ;

- НЛР, включаемого в прямой канал регулирования и работающего по ошибке и ее состав-

ляющим (дифференциальной и интегральной) выходной координаты системы и обеспечивающего требуемые законы регулирования;

— НРЛ, обладающего адаптивными свойствами и включаемого в прямой канал регулирования. Для придания адаптивных свойств регулятору он наделяется адаптивно-нейронной нечеткой системой логического вывода, которая позволяет автоматизировать процесс наполнения базы правил нечеткого регулятора в соответствии с требуемыми оптимальными показателями.

Принцип действия нечеткого логического регулятора заключается в рассмотрении состояния системы и управляющих воздействий как лингвистических переменных и выборе конкретных значений управления на основе нечеткого логического вывода.

Область применения фаззирегуляторов — прежде всего автоматическое регулирование технологических процессов, строгое математическое описание которых для целей автоматического управления методами классической математики представляется затруднительным или даже невозможным.

Системы с фаззирегуляторами являются нелинейными. Основа фаззирегулятора — свод логических правил (ЕСЛИ..., ТОГДА...) — является нелинейной по существу. Нечеткие регуляторы программируются человеческим языком, поскольку они используют для целей управления информацию качественного характера. Как и обычные регуляторы, нечеткие регуляторы используют основополагающий принцип регулирования по отклонению. Выделяется сфера предметных областей, где наиболее целесообразно работать с данными и знанием, представленными языковыми моделями.

Это области с преобладанием эмпирических знаний, где сложность фактов и описаний затрудняет или подчас исключает использование языка математики, так называемые описательные науки, которые в общем-то и стали таковыми, ибо изучают то, что не может быть эффективно обеспечено языком математики, — системно-сложные объекты.

Основными компонентами нечеткого регулятора (НР), входящего в состав интеллектуальных систем управления (ИСУ), являются фаззификатор (Ф), дефаззификатор (ДФ) и блок работы со знаниями (БРЗ).

Фаззификатор предназначен для преобразования точных значений входных сигналов в нечеткие величины, используемые БРЗ при функционировании ИСУ. Дефаззификатор выполняет противоположную функцию и преобразует нечеткие решения в точные значения управляющих воздействий, поступающих на регулятор прямого управления (РПУ).

БРЗ оперирует нечеткими знаниями об объекте управления (ОУ), регуляторе и системе в целом и на основе имеющейся у него информации принимает решение с помощью механизма логического вывода (МЛВ) или машины вывода (МВ) об использовании того или иного управляющего воздействия на регулятор. В зависимости от структуры БРЗ нечеткий регулятор может быть адаптивным, самообучающимся и нечетким регулятором с активной экспертной системой.

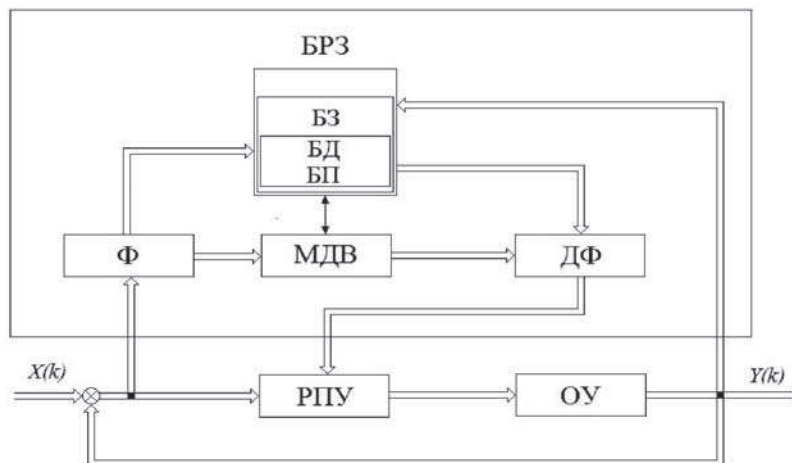


Рис. 3. Типовая схема ИСУ с нечетким регулятором

Нечеткий регулятор, обычно с нечетким алгоритмом управления (НАУ), выполняет следующие функции: с использованием лингвистических переменных и заданных функций принадлежности осуществляется фаззификация введенных входных переменных, производится вывод нечеткого множества управляющих воздействий и далее дефаззификация, то есть получение четких значений сигналов управления. НАУ обеспечивает приблизительно те же действия, которые оператор использует в процессе своей работы при управлении плохо описываемым ОУ.

НР представляет собой основанный на знаниях контроллер в иерархической двухуровневой системе управления, на нижнем уровне которой находится регулятор прямого управления, например ПИД-регулятор.

Верхний уровень НР включает в себя базу знаний и устройства перевода в лингвистические и четкие знания.

Возможное использование нечеткого регулятора для автоматической настройки (адаптации) параметров ПИД-регулятора показано на рис. 4, а.

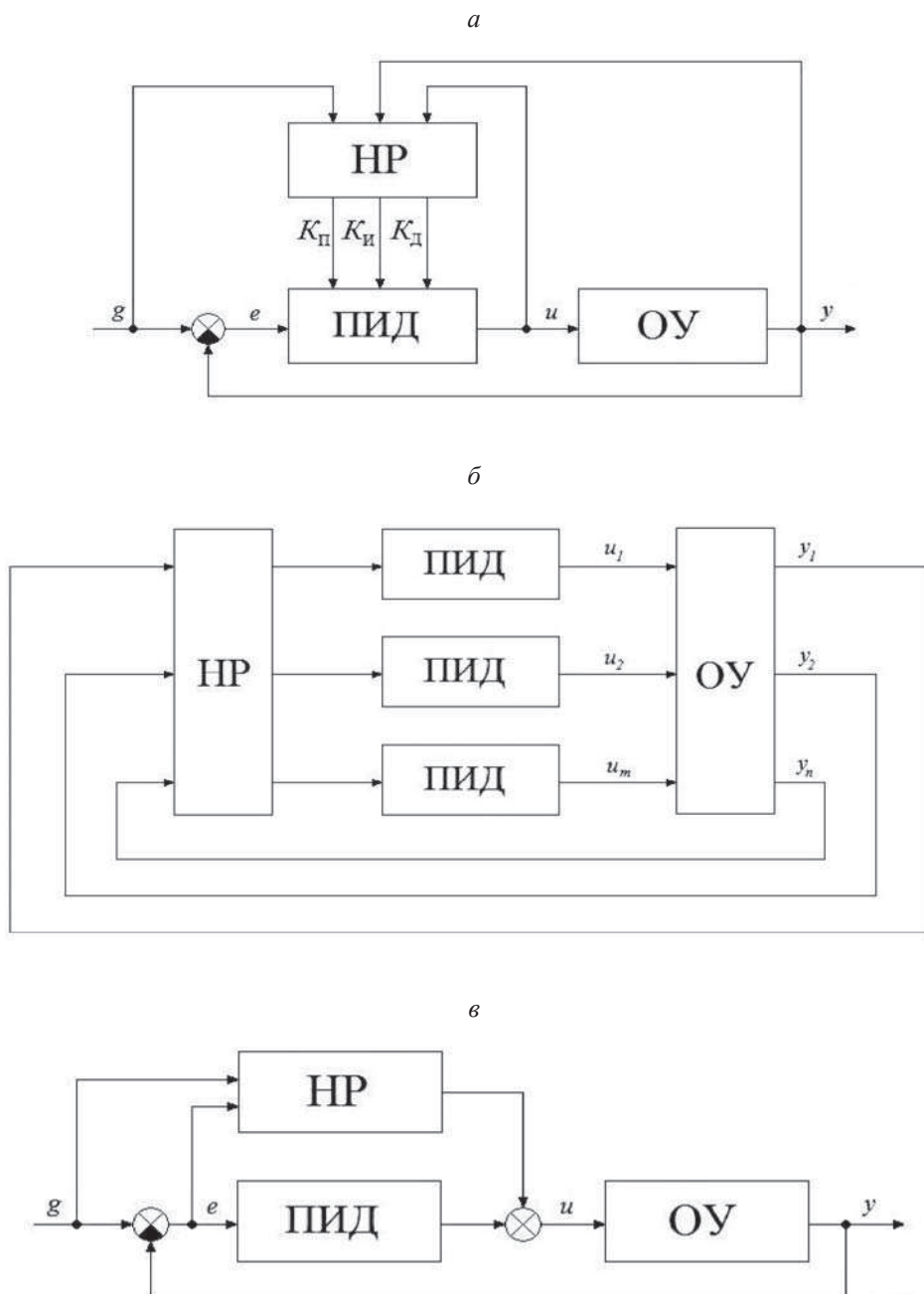


Рис. 4

Другие варианты применения РГ — формирование уставок обычных регуляторов (рис. 4, б); подключение параллельно ПИД-регулятору (рис. 4, в).

В [3] приводится описание нечеткого логического регулятора для системы управления уровнем металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали. Соответствующие детерминированные системы обеспечивают жесткие требования к управлению уровнем металла, но не позволяют сократить время переходного процесса без увеличения ошибки регулирования. Применение нечеткого регулятора позволило сократить время переходного процесса.

Нечеткий контроллер состоит из набора условных лингвистических операторов или правил, называемых НАМ-правилами, задающих конкретные ситуации управления. Структурная схема управления уровнем металла в кристаллизаторе на основе нечеткой логики представлена на рис. 5.



Рис. 5. Структурная схема нечеткого контроллера

В системе используются три переменных:  $e(t)$  — ошибка,  $c(t)$  — скорость изменения ошибки,  $C(k)$  — управляющая переменная.

Нечеткий логический регулятор был внедрен в существующую систему, заменив ПИД-регулятор. Графики переходных процессов систем с ПИД-регулятором и нечетким регулятором показаны на рис. 6.

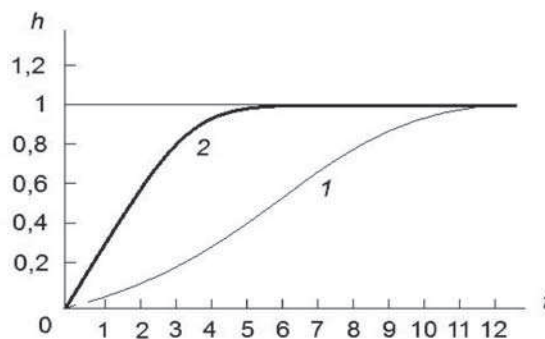


Рис. 6. Переходные характеристики для классического ПИД-регулятора (1) и нечеткого логического регулятора (2)

Как видно из полученных графиков, система с НЛР имеет лучший переходный процесс. Она точнее, чем система с ПИД-регулятором.

### Список литературы

1. Интеллектуальное управление динамическими системами / В. И. Васильев [и др.]. — М.: Физ.-мат. лит., 2000. — 352 с.
2. Васильев В. И. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учеб. пособие / В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов. — М.: Радиотехника, 2009. — 392 с.

3. Жадобин Н. Е. Электронные и микропроцессорные системы управления судовых энергетических и электроэнергетических установок: учебник / Н. Е. Жадобин, Н. А. Алексеев, А. П. Крылов. — М.: Проспект, 2010. — 528 с.

4. Макаров И. М. Интеллектуальные системы автоматического управления / И. М. Макаров, В. М. Лохин. — М.: Физматлит, 2001. — 576 с.

**УДК 621.313**

**С. Г. Черный,**  
канд. техн. наук, доцент кафедры  
электрооборудования  
судов и автоматизации производства,  
Керченский государственный морской  
технологический университет;

**А. А. Жиленков,**  
ст. преподаватель кафедры электрооборудования  
судов и автоматизации производства,  
Керченский государственный морской  
технологический университет

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ДЛЯ СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

### **INTELLECTUAL DECISION SUPPORT AT THE OPTIMUM SYSTEM FOR SHIPS ELECTRICAL POWER SYSTEMS**

*Исследована проблема, когда при определении установленной мощности фильтрокомпенсирующего устройства необходимо учитывать неактивную мощность, потребляемую нагрузкой от источника питания, устройство компенсации может поддерживать заданный показатель качества электроэнергии, регулируя различные показатели качества в нормируемых пределах. Рассмотрен способ идентификации векторов гармоник тока и напряжения сети в реальном времени для использования в системе интеллектуальной поддержки принятия решений при оптимальном управлении фильтрокомпенсирующим устройством.*

*The problem has been reviewed when calculating the nominal power capacity of the filter-compensating device the non-active power being consumed by the load from the power supply should be taken into account; in the process of operation the compensating device may maintain the required parameter of the electric energy quality regulating the various parameters of quality within the nominal range. There has been reviewed a way to identify the circuit current and voltage harmonics in the real time in order to apply in the system of the decision-making intellectual support for optimal governing of the filter-compensating device.*

*Ключевые слова: интеллектуальные системы, идентификация, управление.*

*Key words: intellectual systems, identification, control.*



При определении установленной мощности фильтрокомпенсирующего устройства (ФКУ) наилучший показатель может быть достигнут при применении системы интеллектуальной поддержки принятия решений по регулированию параметров электроэнергии. ФКУ с поддержкой принятия решений обеспечивает максимально полное использование ресурсов автономных электроэнергетических систем (ЭЭС) при поддержании заданных показателей качества