

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 62-83+004.8

Алави Сейед Эняталлах

**СИСТЕМА ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА
ПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ
НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.03 – Электротехнические
комплексы и системы

Минск, 2011

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация
промышленных установок и технологических комплексов»
Белорусского национального технического университета

Научный руководитель	Петренко Юрий Николаевич , кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологи- ческих комплексов», Белорусский нацио- нальный технический университет
Официальные оппоненты:	Ганэ Вадим Арведович , доктор технических наук, профессор, профес- сор кафедры «Информационные системы и технологии», Белорусский национальный технический университет; Марков Александр Владимирович , кандидат технических наук, доцент, заве- дующий кафедрой «Системы управления», УО «Белорусский государственный универ- ситет информатики и радиоэлектроники»
Оппонирующая организация	кафедра «Автоматизация производственных процессов и электротехника», УО «Белорус- ский государственный технологический университет»

Защита состоится «1» июля 2011 г. в 10 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.02 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Белорусского национального технического университета.

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах просим высылать на адрес университета и предварительно отправлять по факсу (8-017)-292-91-37 (для стран СНГ: (8-10-375-17)-292-91-37) на имя председателя совета по защите диссертаций Ф.А. Романюка.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор

И.И. Сергей

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мировой практике существует устойчивая тенденция, наряду с совершенствованием традиционных классических систем управления автоматизированным электроприводом, разработки систем, основанных на приемах искусственного (компьютерного) интеллекта. Исследования в области экспертных систем (ЭС) привлекают все нарастающее внимание в научной и инженерной среде. В особенности это относится к нечеткой логике (fuzzy logic), нейронным сетям (neural networks) и вероятностным методам, таким как генетические алгоритмы (genetic algorithms). Со времени возникновения понятия “искусственный интеллект”, который можно назвать с таким же правом “компьютерный интеллект” (КИ), продолжается дискуссия относительно его принадлежности к интеллекту вообще, которой возможно не будет конца. Автоматизированный электропривод (АЭП), как технологическая отрасль, претерпел существенные изменения и достиг, в определенном смысле, совершенства. Определенным этапом интеграции систем управления электроприводом явилось создание ведущими электротехническими фирмами программируемых микроконтроллеров и промышленных компьютеров. Свидетельством широкого распространения подобных систем является появившийся недавно термин “компьютеризированный электропривод”.

Актуальной задачей является совершенствование традиционных и разработка новых систем автоматического управления электроприводом.

Современные ведущие специалисты в области АЭП подчеркивают необходимость разработки “нетрадиционных систем управления”. К ним относятся доктора технических наук, профессора Белов М.П., Борцов Ю.А., Вейнмистер А.В., Ильинский Н.Ф., Ковчин С.А., Кузнецов В.Е., Новиков В.А., Пантелеев В.И., Поляков Н.Д., Рассудов Л.Н., Терехов В.М., Хватов С.В.

Актуальность такого направления подтверждается также многочисленными и все возрастающими публикациями в русскоязычной и зарубежной литературе, примерами использования таких систем в различных отраслях инженерной деятельности.

Сказанное в полной мере относится к автоматизированному электроприводу бесколебательного управления тележкой мостового крана.

В имеющейся практике основой бесколебательного управления тележкой (БУТ) являются системы каскадного (подчиненного) управления, в том числе построенные с применением управляющей модели и системы релейного (разрывного) управления, получившие название “банг-банг” управление.

Практически отсутствуют разработки, касающиеся управления электроприводами, в том числе для БУТ, построенные на приемах КИ-нечеткой логики за исключением работ, содержащих общую постановку задачи. Та-

ким образом, разработка методов синтеза и анализа структурных и алгоритмических решений контроллера нечеткой логики (КНЛ) для бесколебательного управления электроприводом тележки мостового крана является актуальной задачей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Работа выполнялась в соответствии с темой научно-исследовательской работы кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета «Разработать теоретические основы, методы исследований и средства совершенствования автоматизированных электроприводов с бесконтактными двигателями» (ГБ 01-218).

Цель и задачи исследования

Цель диссертационной работы заключается в разработке структур, алгоритмов и методов синтеза и анализа КНЛ электропривода тележки мостового крана, что позволяет повысить эффективность управления механизмом. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Разработать методику и исследовать показатели бесколебательного управления электроприводом тележки мостового крана с применением теории грубого набора.
2. Создать структуру контроллера на основе аппарата нечеткой логики (НЛ), оптимизированную по параметрам функций принадлежности, для бесколебательного управления электроприводом тележки мостового крана.
3. Усовершенствовать математические модели бесколебательного управления электроприводом тележки мостового крана с контроллером нечеткой логики и разработать методику проектирования контроллера нечеткой логики.
4. Разработать методику проектирования КНЛ с применением теории генетических алгоритмов.
5. Разработать имитационные модели, в том числе трехмерную модель мостового крана, и исследовать динамические характеристики электроприводов крана с контроллером нечеткой логики и провести оценку их параметров.

Объектом исследования является электропривод тележки мостового крана.

Предмет исследования – система бесколебательного управления электроприводом тележки мостового крана.

Положения диссертации, выносимые на защиту

Автором защищаются:

1. Методика и результаты исследования показателей бесколебательного управления электроприводом тележки мостового крана с применением теории «грубого набора».
2. Структура контроллера в части оптимизации количества лингвистических переменных и функций принадлежности с учетом ограничения колебаний и алгоритм его функционирования на основе аппарата НЛ для управления электроприводом тележки мостового крана.
3. Методика синтеза контроллера НЛ с применением генетических алгоритмов.
4. Трехмерная имитационная модель мостового крана с управлением от КНЛ.
5. Оценки эффективности управления.

Личный вклад соискателя

Научные и практические результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены лично соискателем или при его участии. Гипотеза, общие направления исследований были разработаны и реализованы при участии научного руководителя.

Апробация результатов диссертации

Основные теоретические положения, выводы и рекомендации диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на:

- Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (г. Гомель, 2009 г., 2010 г.);
- Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике», БНТУ (г. Минск, 2007 г., 2008 г., 2009 г.);
- Международной научно-технической конференции «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов», БГТУ (г. Минск, 2006 г., 2009 г.);
- Международной научно-технической конференции «Энергоэффективные технологии. Образование. Наука. Практика», РИИТ БНТУ (г. Минск, 2010 г.);
- Международной научно-технической конференции «Совершенствование систем автоматизации технологических процессов», БНТУ (г. Минск, 2010 г.);
- Международной научно-технической конференции «Информационные технологии в промышленности» (ITI*2008, ITI*2010), Минск, ОИПИ НАН Беларуси (2008 г., 2010 г.);

– Международной научно-технической конференции «Автоматизации технологических процессов» (г. Минск, 2011 г.);

– Научной конференции Иранских студентов, проживающих в Беларуси (г. Минск, 2008 г., 2009 г.).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты исследования отражены в 4 публикациях в научно-технических журналах, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, что составляет 1,5 авторских листа. Также опубликовано 17 материалов научных конференций и тезисов докладов на научно-технических конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы составляет 181 страницу, в том числе 47 рисунков, 2 приложения на 36 страницах и список из 123 использованных источников на 10 страницах.

Основное содержание работы

Во введении дана оценка состояния исследований в области автоматизированного электропривода (АЭП). Независимо от вида технологического процесса, АЭП является существенной его составляющей, часто обеспечивая высокую производительность, надежность, экономичное расходование электроэнергии, комфортность и гибкость управления и производства.

Электропривод, как технологическая отрасль, претерпел существенные изменения и достиг в определенном смысле совершенства. В первую очередь сказанное следует отнести к состоянию силовой электроники и элементной базы управления. Мощные IGBT и MOSFET транзисторы позволяют построить совершенные методы преобразования электроэнергии для управления всеми типами двигателей постоянного и переменного тока. Микропроцессорная техника позволяет реализовать достаточно сложные алгоритмы управления как аппаратными, так и программными средствами. Это обеспечило рост применения регулируемого электропривода в общей доле его применения.

Определенным этапом интеграции систем управления электроприводом явилось создание ведущими электротехническими фирмами программируемых микроконтроллеров и промышленных компьютеров. Свидетельством широкого распространения подобных систем является появившийся недавно термин “компьютеризированный электропривод”.

Компьютеризированный электропривод является компонентом интегрированных систем распределенной автоматизации технологических процессов с

широким использованием сетевых технологий. Основные методы синтеза АЭП разработаны в 50–60-е годы двадцатого столетия, т.е. в “докомпьютерную эру”. Их применение совершенствовалось в 80–90-е годы и связано с возрастающей ролью компьютерной техники. Поэтому актуальной задачей является совершенствование традиционных и разработка новых систем автоматического управления АЭП.

В первой главе приведен обзор существующих решений, обеспечивающих бесколебательное управление электроприводами мостовых кранов. Одной из систем, позволяющих осуществлять высокоточное, быстрое и плавное передвижение груза, является САР колебаний *HIPAC (Highly Intelligent Pendulum and Automation Control)* фирмы *Siemens*. *HIPAC* реализована на быстродействующей микропроцессорной системе, включенной в канал регулирования контроллера *SIMATIC* и корректирует задание на скорость передвижения тележки, влияя на ускорение при возникновении отклонения груза от положения равновесия. Логическим продолжением *HIPAC* стала разработанная в последнее время и интегрируемая в преобразователь частоты система регулирования *DRIVE-PAC*, которая установлена непосредственно в преобразователь частоты *SIMONVERT MASTER DRIVE VC* или в привод постоянного тока *SIMOREG*. Применение названных систем позволяет в значительной мере ограничить раскачивание груза. Однако, их высокая стоимость и сложность обслуживания препятствуют внедрению подобных систем на отечественных промышленных предприятиях.

Таким образом, в настоящее время разработка автоматической системы эффективного гашения колебаний транспортируемого груза, не уступающей зарубежным аналогам, является весьма актуальной задачей.

Во второй главе показано, что исследования в области экспертных систем (ЭС) привлекает все нарастающее внимание в научной и инженерной среде. В особенности это относится к нечеткой логике (fuzzy logic), нейронным сетям (neural networks) и вероятностным методам, таким как генетические алгоритмы (genetic algorithms)

СНЛ являются системы, основанные на правилах экспертных систем (rule-based systems), в которых вход в начале подвергается фазификации (то есть преобразуется из набора нечетких величин в нечеткое множество), далее последовательно преобразуется с помощью генератора, который использует знания в форме нечетких правил. Нечеткие множества обрабатываются (computed) фаззи-генератором так, что выход каждого правила в итоге обобщается (composed) и дефазифицируется (т.е. преобразуется из НЛ в обычную логику).

В более общем смысле система НЛ является нелинейным соотношением между пространством входа и выхода.

Функционирование СНЛ основано на правилах, содержащихся в базе правил. Правило l имеет в базе правил следующую форму:

$$R^{(l)} : \text{ЕСЛИ } u_1 \text{ есть } A_{1l}, \text{ и } u_2 \text{ есть } A_{2l}, \dots \text{ и } u_n \text{ есть } A_{nl}, \text{ ТО } v \text{ есть } B'.$$

Первые n термов называются антецедентами правила, в то время как последние термы (после слова **ТО**) являются последствием (следствием) правил. Термы u_i являются нечеткими переменными, а термы A_{il} являются лингвистическими переменными.

Необходимо заметить, что входы СНЛ в определенной степени соответствуют антецедентам правил в базе правил. Роль фазификатора в СНЛ состоит в конвертировании логических входных переменных в нечеткое множество, пригодное для обработки генератором вывода. Генератор вывода, используя фазифицированные входные сигналы и правила, сохраненные в базе правил, обрабатывает входную информацию и выдает нечеткой выход. Эти сигналы должны быть использованы во внешней (по отношению к нечеткой системе) среде, поэтому они должны быть конвертированы из НЛ в обычную (не нечеткую) и это выполняется дефазификатором.

Фазификация может быть определена как операция, которая сопоставляет логический объект в нечеткое множество, т.е. в функцию принадлежности.

По мере фазификации входов, соответствующие входные нечеткие множества поступают на выходной генератор, который обрабатывает текущие входы, используя правила восстановления, содержащиеся в базе правил. Выходом этих правил в обобщенном виде является выход нечеткого множества B^l , близкой к B_l . Вход в этом случае отличается, уже не является скаляром, а вектором. Таким образом, в этом случае получаем $A=A^l = A_{1l} \times A_{2l} \times \dots \times A_{nl}$ и $B=B^l$ и работа генератора продолжается. Таким образом, получим

$$\mu_{B^{l*}}(y) = \sup_{x \in A^*} [\mu_{A^*}(x) \otimes \mu_{A^l} \rightarrow B^l(x, y)], \quad (1)$$

где используя инженерный прием (так называемую t-нормализацию (оператор $\otimes : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ используется для пересечения множеств, который обозначается “min” или умножение) получим

$$\begin{aligned} \mu_{B^{l*}}(y) &= \sup_{x \in A^*} [\mu_{A^*}(x) \otimes \mu_{A^l}(x) \otimes \mu_{B^l}(y)] = \\ &= \mu_{B^l}(y) \otimes \sup_{x \in A^*} [\mu_{A^*}(x) \otimes \mu_{A^l}(x)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя t-norm как соединитель для антецедентов и обозначая x_i результаты, соответствующие A^* , получаем

$$\begin{aligned}\mu_{A^*}(x) &= \mu_{x_{i1}}(x_1) \otimes \mu_{x_{i2}}(x_2) \otimes \dots \otimes \mu_{x_{in}}(x_n); \\ \mu_{A^l}(x) &= \mu_{A_{1l}}(x_1) \otimes \mu_{A_{2l}}(x_2) \otimes \dots \otimes \mu_{A_{nl}}(x_n)\end{aligned}\quad (3)$$

Подставляя (2) в (3) и преобразуя, получим

$$\mu_{B^*}(y) = \mu_{B^l}(y) \otimes \sup_{x \in A^*} \left\{ \begin{array}{l} [\mu_{x_{i1}}(x_1) \otimes \mu_{A_{1l}}(x_1)] \otimes \\ [\mu_{x_{i2}}(x_2) \otimes \mu_{A_{2l}}(x_2)] \otimes \dots \otimes \\ [\mu_{x_{in}}(x_n) \otimes \mu_{A_{nl}}(x_n)] \otimes \end{array} \right\} \quad (4)$$

Учитывая, что $\mu_{x_{ij}}$ в (4) является объединением, запишем окончательное выражение для функций принадлежности выхода нечеткого множества как результат l -го нечеткого правила, когда пользуется оператор инженерного приложения совместно с единичный фазификацией

$$\mu_{B^*}(y) = \mu_{B^l}(y) \otimes \mu_{A_{1l}}(x_{i1}) \otimes \mu_{A_{2l}}(x_{i2}) \otimes \dots \otimes \mu_{A_{nl}}(x_{in}) \quad (5)$$

Таким образом, на выходе генератора всегда имеется нечеткое множество $\mu_y(y)$, которое получается путем композиции выходов нечеткого множества каждым из правил, используя (4). Для использования этих правил в реальных системах управления, они (выходные нечеткие множества) должны быть конвертированы в пространство жесткой логики. Эта операция выполняется дефазификатором. Одним из ключевых вопросов построения контроллера с использованием принципов НЛ является конструирование базы правил. В рамках рассматриваемой для оптимизации базы правил для систем, основанных на нечеткой логике, представляют интерес методы теории грубого набора (ТГН) (Rough Set Theory).

Для определенности систему управления АЭП тележки (моста) мостового крана представим в виде рисунка 1.

Для начала воспользуемся рекомендациями литературы и примем семь функций принадлежности (ФП) для описания каждого из двух входов и выхода контроллера: NB – отрицательный большой, NM – отрицательный средний, NS – отрицательный маленький, Z – ноль, PS – положительный маленький, PM – положительный средний, PB – положительный большой. Правила контроллера представлены в таблице 1.

Входные величины КНЛ описывают переменные, имеющие место при отклонении груза от вертикали.

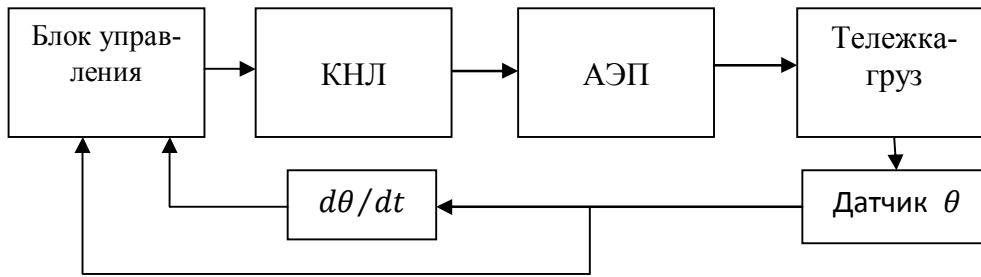


Рисунок 1 – Структурная схема АЭП тележки с КНЛ

Таблица 1 – База правил обычного нечеткого логического контроллера для управления электроприводом подъемного крана (моста и/или тележки)

при движении

$d\theta/dt$ θ	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	<u>PS</u>	PS	Z
NM	PB	PM	PM	PS	<u>PS</u>	Z	NS
NS	PM	PM	PS	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PS	PS	<u>Z</u>	NS	NS	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	PS	Z	<u>NS</u>	NS	NM	NM	NB
PB	Z	NS	<u>NS</u>	NM	NM	NB	NB

ТГН позволяет сконструировать новую таблицу базы правил. Видно, что в базе правил содержатся элементы, совпадающие с условиями, и поэтому являются избыточными. Так, в нашем случае универсальное множество $U = \{49 \text{ правил}\}$ (см. таблицу.1) и верхний грубый набор $R^U = \{49\}$, в то время как классы эквивалентности следующие: в таблице 2 может видеть число каждый элемент, это число, равное с $E(R^U X)$ в каждом ряду. $NB = \{3\}$, $NM = \{7\}$, $NS = \{11\}$, $Z = \{7\}$, $PS = \{11\}$, $PM = \{7\}$, $PB = \{3\}$.

Для каждой строки можно получить $\alpha_R(X1) = \alpha_R(NB) = \frac{E(R_L(NB))}{E(R^U(NB))} = 1/3$,

$$\alpha_R(X2) = \alpha_R(NM) = 1/7, \quad \alpha_R(X3) = \alpha_R(NS) = 0/11, \quad \alpha_R(X4) = \alpha_R(Z) = 1/7,$$

$$\alpha_R(X5) = \alpha_R(PS) = 0/11, \quad \alpha_R(X6) = \alpha_R(PM) = 1/7, \quad \alpha_R(X7) = \alpha_R(PB) = 1/7,$$

где $E(R_L(X_i))$ – сумма числа элементов, одинаковых в столбце и строке;

В таблице 2 эти элементы выделены подчеркиванием.

Таким образом, количество правил уменьшается и теперь равно 25 как дано в таблице 2, где представлены две входные и одна выходная величины.

В таблице 3 приведены сравнительные показатели управления при использовании КНЛ и ТГН. (ISE- интегральная квадратичная шибка, IAE- интегральная абсолютная ошибка);

$$X = l \sin \theta(t), \quad ISE = \sum (X)^2 = \sum (l \sin \theta(t))^2, \quad IAE = \sum |X| = \sum |l \sin \theta(t)|.$$

Таблица 2 – База правил нечеткого логического контроллера, построенная с применением теории грубого набора (КНЛ-ТГН)

$\begin{matrix} de/dt \\ e \end{matrix}$	PL	PS	Z	NS	NL
NL	$\alpha_R(X4)$	$\alpha_R(X3)$	$\alpha_R(X2)$	$\alpha_R(X1)$	$\alpha_R(X7)$
NS	$\alpha_R(X5)$	$\alpha_R(X4)$	$\alpha_R(X3)$	$\alpha_R(X2)$	$\alpha_R(X1)$
Z	$\alpha_R(X6)$	$\alpha_R(X5)$	$\alpha_R(X4)$	$\alpha_R(X3)$	$\alpha_R(X2)$
PS	$\alpha_R(X7)$	$\alpha_R(X6)$	$\alpha_R(X5)$	$\alpha_R(X4)$	$\alpha_R(X3)$
PL	$\alpha_R(X1)$	$\alpha_R(X7)$	$\alpha_R(X6)$	$\alpha_R(X5)$	$\alpha_R(X4)$

Таблица 3 – К оценке качественных показателей управления

	ISE	IAE	Time, c
КНЛ-ТГН	2.3	3.1	8
КНЛ	3.56	3.98	11

По приведенным критериям, а также по времени регулирования, контроллер, спроектированный с применением ТГН, имеет преимущество относительно контроллера на основе нечеткой логики, что говорит о перспективности его применения для определенного класса систем.

В третьей главе решается задача нахождения базы нечетких правил на основе генетических алгоритмов (ГА) для контроллера замкнутой системы управления, приведенной на рисунке 1. Генетический алгоритм представляет собой комбинацию переборного и градиентного методов. Механизмы кроссовера (скрещивания) и мутации реализуют переборную часть, а отбор лучших решений – градиентный спуск. Другими словами это означает, что если на некотором множестве задана сложная функция от нескольких переменных, тогда ГА является программой, которая за допустимое время находит точку, где значение функции находится довольно близко к максимально (минимально) возможному значению. Выбирая приемлемое время расчета, получаем лучшие решения, которые можно получить за это время.

Поставлена задачи разработать новый метод, основанный на ГА, способный сгенерировать удовлетворительную базу нечетких правил для управления нелинейной системой. Во-первых, определим форму базы нечетких правил, которую собираемся получить. Каждое правило базы нечетких правил, имеющей m входов и n выходов представим следующим образом:

$R(j_1, j_2, \dots, j_m)$: ЕСЛИ x_1 есть $A_{(1, j_1)}$ и...и x_m есть $A_{(m, j_m)}$ ТОГДА y_1 есть $B_1(j_1, j_2, \dots, j_m)$ и...и y_n есть $B_n(j_1, j_2, \dots, j_m)$ $j_i \in \{1, 2, \dots, k\}$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$, где $R(j_1, j_2, \dots, j_m)$) есть (j_1, j_2, \dots, j_m) -th правило, x_i s местоположение входных переменных, y_i s выходные переменные, $A_{(i, j_i)}$ есть j_i -th нечеткие наборы входных переменных x_i , и $B_i(j_1, j_2, \dots, j_m)$ есть (j_1, j_2, \dots, j_m) -th правило набора нечетких одноэлементных множеств выходной переменной y_i .

Функции принадлежности нечеткого множества $A_{(i, h, v)}$ приняты гауссовой формы, представленной в виде

$$A_{(i, h, v)}(c_i, \sigma_i, x_i) = e^{-\frac{(x_i - c_i)^2}{2\sigma_i^2}}, \quad (6)$$

где c_i центр нечеткого множества, σ_i отклонение этой ФП.

Для базы правил нужно выбрать выходной генератор и какой-либо из известных способов дефазификации. Выбираем дефазификацию по взвешенному центру гравитации.

В представленном методе ГА играет ключевую роль для поиска оптимальных параметров. Эти параметры включают число нечетких правил, расположение всех центров $c_{(i, j_i)}$ и $\sigma_{(i, j_i)}$ (т.е., всех функций принадлежности) $A(i, j_i)$ и выхода системы $B(j_1, j_2, \dots, j_i)$ так, чтобы система управления удовлетворяла заданным критериям. Применение ГА начинается с кодирования хромосомы.

Для каждого нечеткого набора входных переменных x_i устанавливаем три кодовых последовательности. Верхняя последовательность состоит из $d_{(i, j_i)}$ s (названной d -строкой), двоичные коды которой обозначаются индексом $c_{(i, j_i)}$ s или $\sigma_{(i, j_i)}$ s (c для нечетной итерации и σ для четной итерации).

Нижняя строка, состоящая из $c_{(i, j_i)}$ s (названной c -строкой) или $\sigma_{(i, j_i)}$ s (названной v -строкой), которые являются реальными величинами, означающими местоположение центра или отклонение нечетких множеств $A(i, j_i)$.

В дальнейшем будем рассматривать только c -строки, v -строки одинаковы для четных итераций. Далее определим, что значение $d_{(i, j_i)} = 1$ означает полноценность (полную пригодность) $c_{(i, j_i)}$, в то время как значение $d_{(i, j_i)} = 0$ означает непригодность $c_{(i, j_i)}$.

Заметим, что $c_{(i, j_i)}$ — это центр $A(i, j_i)$. Таким образом, если $c_{(i, j_i)}$ непригодно, то $A(i, j_i)$ также непригодно. Следствие $B(j_1, j_2)$ имеет действительный номер, означающий позицию единичного множества, которая зависит от $d_{(1, j_1)}$ и $d_{(2, j_2)}$. При любом $d_{(i, j_i)} = 0$ ($i=1$ или 2), соответствующий выход, т.е. $B(j_1, j_2)$, теряет свой смысл (т.е. является бесполезным и игнорируется). Таким образом,

правило $R(j_1, j_2)$ является бесполезным. Только оба $d_{(i, j_i)} = 1$ для $i=1,2$, будут полезными и их величина будет определена посредством ГА. Другими словами, лишь в случае, когда оба $d_{(i, j_i)} = 0$ для $i=1,2$, $B(j_1, j_2)$ будет изменяться в новой генерации ГА в виде новой хромосомы. В противном случае величина $B(j_1, j_2)$ остается той же и будет игнорирована.

После формирования кодов условий и следствий производится полная индивидуальная хромосома, которая для иллюстрированной нечеткой системы представлена на рисунке 2. Верхняя последовательность – это d -строка, а нижняя последовательность – это комбинация c -строки и следствия – B -строки (v -последовательности для четных итераций).

Таким образом, на основе теории ГА, здесь используются три ключевые генетических операции: *воспроизводство*, *переход* и *мутация*. Воспользуемся приемом, который назван иерархической мутацией, при которой сначала видоизменяем d -последовательность и затем мутируем c - и B -последовательности.

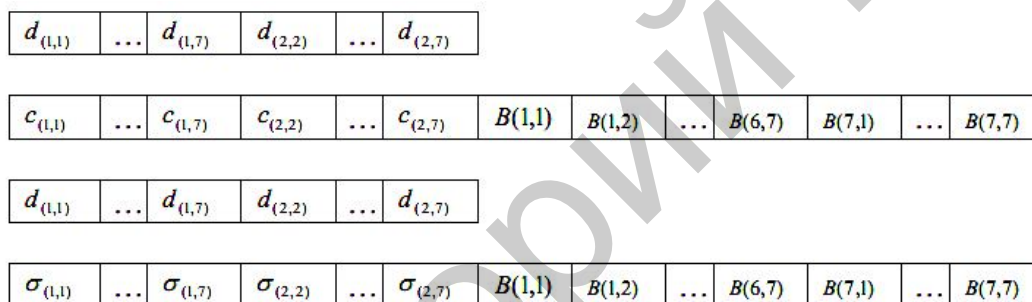
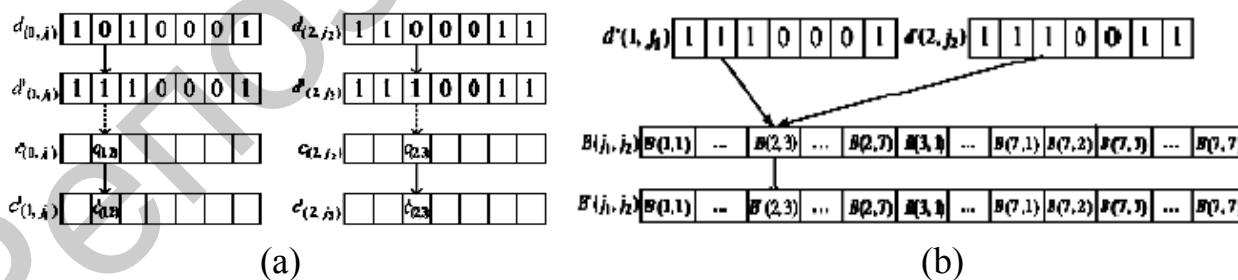


Рисунок 2 – Завершенная хромосома

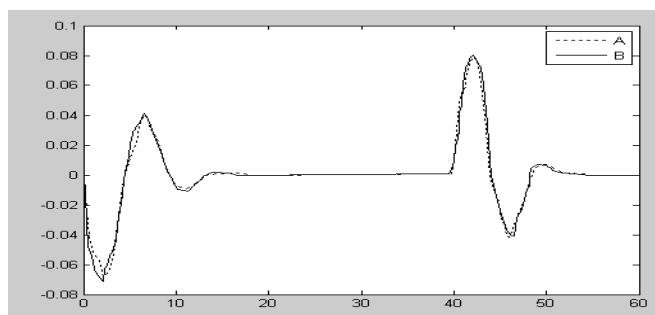
Эффективность каждой хромосомы (фактически одной базы правил) в поколении определяется с помощью функции пригодности. На основе разработанного алгоритма применения ГА получена база правил.



а – мутация между $d_{(1, j_i)}$ и $c_{(1, j_i)}$, $i \in \{1,2\}$; б – строка $B(j_1, j_2)$ перед и после мутации

Рисунок 3 – Иерархическая мутация:

Результаты усовершенствования показывают, что технология ГА позволяет получить меньшее количество правил КНЛ без потери качества управления (рисунок 4).



А – с обычным КНЛ при $M = 7$; В – с контроллером, полученным на основе ГА при $M = 5$
 (по горизонтали время в C и по вертикали угол в rad)

Рисунок 4 – Колебания груза при перемещении:

В четвертой главе разработаны обобщенная математическая трехмерная (3D) модель подъемного крана и выполнено имитационное моделирование (ИМ) тележки и моста. Крановая система является не полностью управляемой системой в том смысле, что число контролируемых переменных (позиция груза и угол его отклонения от вертикали) меньше чем число управляющих сигналов (усилие на тележку).

Для получения 3-D математической модели крана воспользуемся рисунком 5, где обозначено: X и Y – направления движения тележки 1 и моста 2 соответственно; φ – угол между осью Y' и проекцией каната 3 с грузом 4 на плоскость $X'-Y'$; θ – угол между вертикалью и канатом 3; $x(t), y(t) \in R$ – положение тележки моста в координатах $X-Y$ соответственно; F_x и F_y – управляющие усилия, приложенные к тележке и мосту соответственно;

Примем ряд допущений, общепринятых в практике:

- 1) массой каната пренебрегаем; 2) доступна информация об угле отклонения груза и его производной и скорости моста и тележки; 3) заданы величины (являются известными) массы груза и длина каната; 4) пренебрегаем трениями грузозахватывающего устройства и вращения груза относительно оси каната; 5) угол массы груза ограничен соотношением $-\pi < \theta < \pi$.

При принятых допущениях, динамика 3-D мостового крана описывается соотношением

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = u \quad (7)$$

где $q(t) \in R^4$ определяется как $q = [x \ y \ \theta \ \varphi]^T$, $M(q) \in R^{4 \times 4}$, $v(q, \dot{q}) \in R^{4 \times 4}$, и $G(q) \in R^4$ есть инерция, $u = [F_x \ F_y \ 0 \ 0]^T$, и составляющие массы,

Следует признать целесообразным максимальное использование стандартных блоков MATLAB-SIMULINK, хорошо зарекомендовавших себя при моделировании различных систем электропривода.

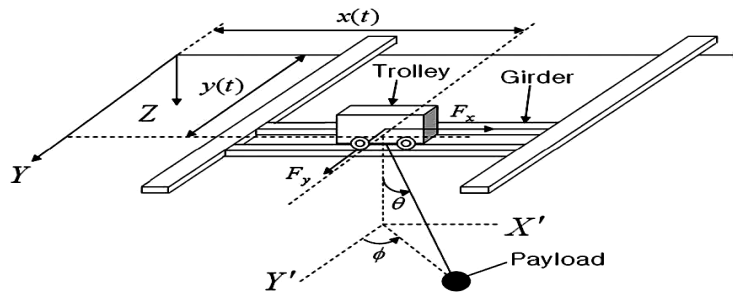


Рисунок 5 – Модель (3-D) крана

Такое представление позволяет выделить отдельные функциональные блоки, которые могут быть исследованы самостоятельно или/и в комбинации с другими без использования всей системы ИМ. Это особенно необходимо на начальной стадии отладки ИМ. Разработаны: **имитационная модель крана, имитационная модель 3-D крана, имитационная модель тележки мостового крана с КНЛ**. Последняя изображена на рисунке 6. При моделировании необходимо учитывать следующие особенности. Для сравнения напомним анализ и настройку системы подчиненного (каскадного) регулирования. В такой системе ИМ и реальный объект позволяют проследить прохождение сигнала по отдельным субблокам системы.

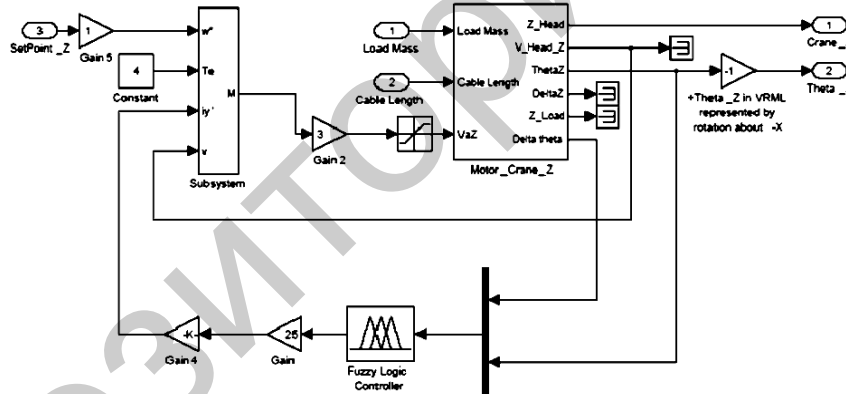


Рисунок 6 – Имитационная модель тележки мостового крана с КНЛ

При анализе динамики такой сложной системы, содержащей КНЛ, Блок «АД с векторным управлением» выполнен по стандартной схеме SIMULINK, предусматривающей каскадное управление. Использование отлаженных блоков управления позволяет избежать эффекта наложения ошибок, при котором трудно выяснить причину неадекватного поведения системы. Систематизирована процедура проектирования КНЛ, которая приведена в виде последовательности отдельных этапов с определением параметров контроллера.

Для определения диапазона изменения названных переменных моделируем разомкнутую систему, в результате чего определено $\theta : [-0.03, 0.03]$, $\frac{d\theta}{dt} : [-0.06, 0.06]$. Диапазон изменения выходного сигнала в относительных единицах принимаем $[-1, 1]$.

Далее при моделировании и сравнении работы контроллеров используется треугольная форма функций принадлежности. Это связано с тем, что серийно выпускаемые микропроцессоры 68HC912D60 и 68HC12/912 семейства Motorola поддерживают лишь треугольную форму функций принадлежности.

Получены и обобщены результаты моделирования системы с различным числом функций принадлежности M ($M=3$, $M=5$ и $M=7$). В качестве примера приведены результаты ИМ на рисунках 7, 8, 9. Для фазификации применен MIN метод, для дефазификации – MAX метод.

Обсуждение результатов моделирования.

Основной целью имитационного моделирования является проверка и подтверждение работоспособности предлагаемых решений по КНЛ.

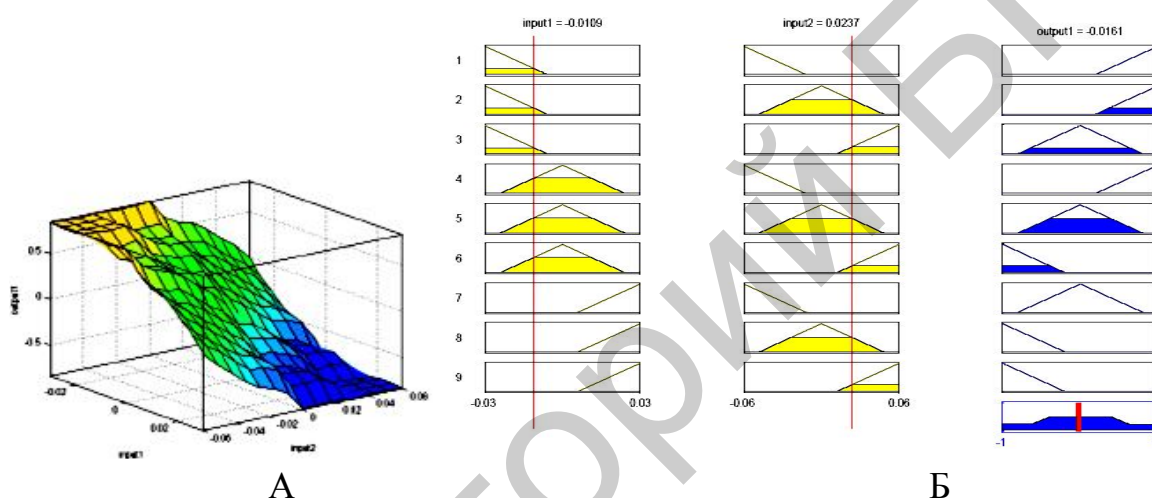
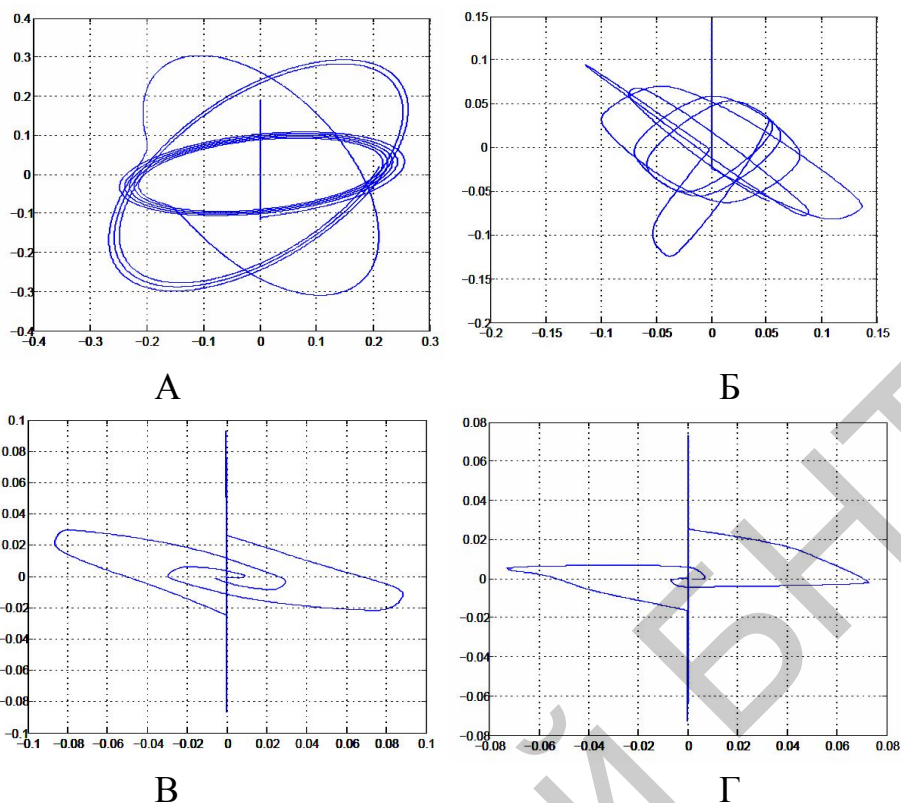


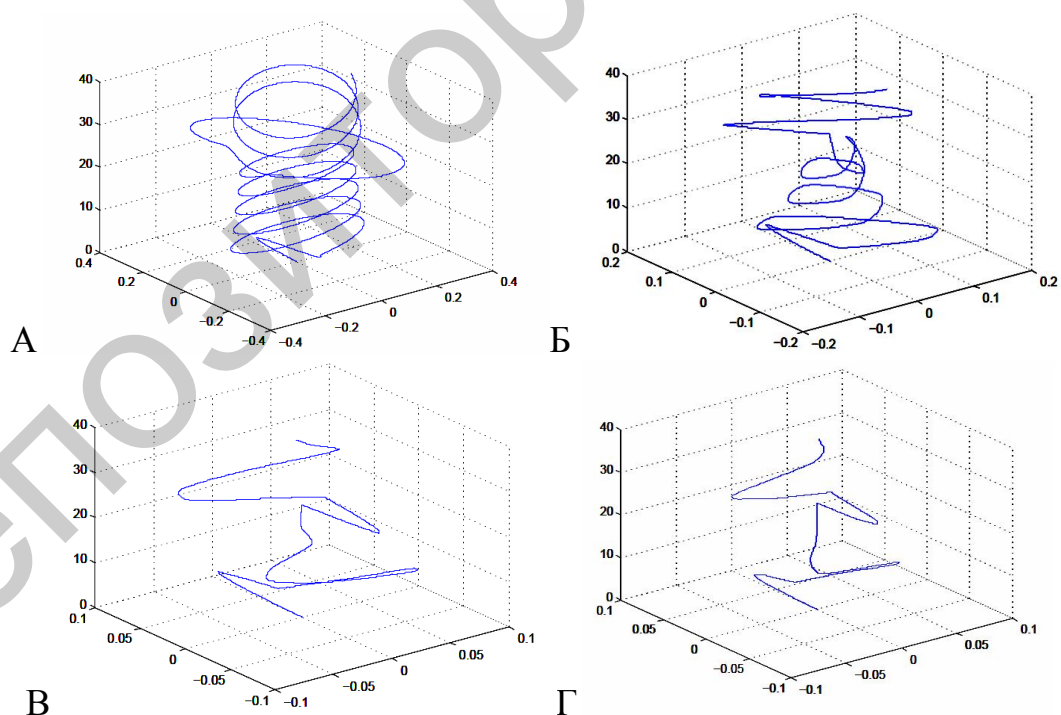
Рисунок 7 – Поверхности нечеткого вывода для разработанной нечеткой модели при $M=3$ (А).

Вид программы просмотра правил нечеткого вывода для $M=3$ (Б)

В качестве первой задачи моделирования являлось исследование динамики движения тележки, и соответственного груза (далее- динамики) при перемещении. Соответствующие зависимости $V(t)$; $\theta(t)$; $d\theta(t)$ при разомкнутой системе приведены на рисунках 8 и 9. Оси координат: X- по горизонтали; Y- по вертикали. Характер движения, приведенный на этом, хорошо согласуются с исследуемым в известных источниках.



**Рисунок 8 – Колебания груза в плоскости xu , m , канат=10 m , груз=10 t
 Старт моста при $X=0$ и тележки при $X=4$.
 Ручное управление (А), КНЛ, $M=3$ (Б), $M=5$ (В), $M=7$ (Г)**



**Рисунок 9 – Колебания груза в трехмерном пространстве: X – отклонение груза “позиция моста–позиция груза”, m ; Y – отклонение груза “позиция тележки–позиция груза”, m ; Z – время, c
 Старт моста при $X=0$ и тележки при $X=4$. Ручное управление (А);
 КНЛ: $M=3$ (Б), $M=5$ (В), $M=7$ (Г)**

Заключение

В результате проведенных исследований решена научно-прикладная задача по методам синтеза контроллера электропривода тележки мостового крана, основанного на нечетких множествах с применением ТГН и ГА, обеспечивающего бесколебательное перемещение груза, что это подтверждается следующими результатами, полученными в диссертационной работе.

1. Предложена инженерная методика использования ТГН для проектирования КНЛ для управления электроприводом [1, 2, 7, 13, 14, 19].

2. По критериям интегральной квадратичной ошибки и интегральной абсолютной ошибки, а также времени регулирования контроллер на основе ТГН имеет преимущество [1].

3. Показана целесообразность и разработана методика применения теории ГА и соответствующий алгоритм оптимизации, на основе которого синтезированы параметры КНЛ [3, 5, 15, 16, 18, 20].

4. Разработаны имитационные модели для исследования динамики перемещения груза с КНЛ различных модификаций в плоскостях перемещения тележки, моста и в трехмерном пространстве [4, 9, 11, 17, 21].

5. Численные эксперименты, проведенные на разработанной имитационной модели, показали адекватность результатов динамических показателей относительно результатов, имеющихся в литературе и полученных иными способами управления, а также эффективность предлагаемых методик проектирования контроллера электропривода по числу колебаний и максимальному отклонению угла, а также робастности в смысле влияния изменения длины каната [1, 3, 4, 6, 8, 10, 12].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанная методика применения теории ГА и соответствующий алгоритм оптимизации, на основе которого синтезированы параметры КНЛ, может применяться для подъемных кранов других конструкций (башенных, контейнерных и др.) в которых имеется потенциальная опасность возникновения колебания перемещаемых грузов, а также для класса электроприводов с нечетким знанием параметров механизмов и/или условий работы.

2. Разработанные имитационные модели в среде MATLAB/SIMULINK для исследования динамики перемещения груза с КНЛ различных модификаций в плоскостях перемещения тележки, моста и в трехмерном пространстве могут использоваться в учебном процессе.

Список публикаций соискателя по теме диссертации

Статьи

1. Алави, С.Э. Управление подъемным краном с использованием нечеткого логического диспетчера / С.Э. Алави, Ю.Н. Петренко // Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Энергетика. – 2008. – № 6. – С. 37–42.
2. Алави, С.Э. Контроллер позиционного электропривода на основе нечеткой логики / С.Э. Алави, Ю.Н. Петренко // Труды Белорусского государственного технологического университета. – 2008. – Вып. XVI, № 16. – С. 49–52.
3. Алави, С.Э. Контроллер нечеткой логики на основе генетических алгоритмов для электропривода тележки подъемного крана / С.Э. Алави, Ю.Н. Петренко // Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Энергетика. – 2009. – № 2. – С. 17–22.
4. Петренко, Ю.Н. Исследование работы мостового крана с контроллером нечеткой логики на основе трехмерной имитационной модели / Ю.Н. Петренко, С.Э. Алави, С.В. Александровский // Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Энергетика. – 2011. – № 3. – С. 20–25.

Материалы научных конференций

5. Petrenko, Y.N. Fuzzy logic and genetic algorithm technique for non-linear system of overhead crane / Y.N. Petrenko, S.E. Alavi // Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON). 2010 IEEE Region 8 International Conference, 11-15 July 2010. – P. 848–851.
6. Алави, С.Э. Проектирование контроллера для бесколебательного управления перемещением груза подъемным краном / С.Э. Алави // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов : сборник материалов Международной научно-технической конференции г. Минск, 6-8 июня 2006. – С. 95–97.
7. Алави, С.Э. Fuzzy logic controller for non-linear system design / С.Э. Алави, Ю.Н. Петренко // Информационные технологии в промышленности : сборник тезисов пятой Международной научно-технической конференции ITI*2008, г. Минск, 22-24 октябрь 2008. – С. 214–215.
8. Алави, С.Э. Проектирование логического диспетчера для управления электроприводом / С.Э. Алави, Ю.Н. Петренко // Наука – образованию, производству, экономике : сборник тезисов шестой Международной научно-технической конференции БНТУ, г. Минск, 2008. – С. 120.

9. Алави, С.Э. Математические модели электроприводов крановых механизмов / С.Э. Алави, Ю.Н. Петренко // Наука – образованию, производству, экономике : сборник тезисов седьмой Международной научно-технической конференции БНТУ, г. Минск, 2009. – С. 134.
10. Алави, С.Э. Проектирование контроллера нечеткой логики для автоматизированного электропривода / С.Э. Алави, Ю.Н. Петренко // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов сборник материалов Международной научно-технической конференции г. Минск, 28-29 октября 2009. – С. 227–229.
11. Алави, С.Э. Имитационная модель электропривода с контроллером нечеткой логики / С.Э. Алави, С.В. Александровский // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов сборник материалов Международной научно-технической конференции, г. Минск, 28-29 октября 2009. – С. 230–232.
12. Алави, С.Э. A fuzzy set theory based control of a nonlinear dynamic system / С.Э. Алави // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : сборник материалов XII республиканской научной конференции студентов, аспирантов и магистрантов, г. Гомель, 16-18 марта 2009. – С. 3–4.
13. Алави, С.Э. Экспертные системы в управлении нелинейными объектами / С.Э. Алави, Ю.Н. Петренко // Энергоэффективные технологии. Образование. Наука. Практика : сборник материалов Международной научно-технической конференции, г. Минск, 20-21 мая 2010. – С. 23–27.
14. Алави, С.Э. Экспертные системы для управления нелинейными объектами / С.Э. Алави // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях : сборник материалов XIII республиканской научной конференции студентов, аспирантов и магистрантов, г. Гомель, 15-17 март 2010. – С. 3–4.
15. Алави, С.Э. Совершенствование регуляторов антиколебательного движения / С.Э. Алави // Совершенствование систем автоматизации технологических процессов : сборник тезисов Международной научно-технической конференции БНТУ, г. Минск, 2010. – С. 32.
16. Alavi, S.E. System control, based on the artificial intelligence techniques / S.E. Alavi, Y.N. Petrenko // Информационные технологии в промышленности : сборник тезисов шестой Международной научно-технической конференции ITI*2010, г. Минск, 28-29 октября 2010. – С. 170–171.
17. Александровский, С.В. Математическая модель автоматизированного электропривода с векторным управлением / С.В. Александровский, С.Э. Алави // Информационные технологии в промышленности : сборник тезисов шестой

Международной научно-технической конференции ИТ*2010, г. Минск, 28-29 октябрь 2010. – С. 168–169.

18. Алави, С.Э. Моделирование электропривода тележки мостового крана с контроллером нечеткой логики на основе генетических алгоритмов / С.Э. Алави, Ю.Н. Петренко // Наука – образованию, производству, экономике : сборник тезисов седьмой Международной научно-технической конференции БНТУ, г. Минск, 2010. – С. 202.
19. کنترل کننده فازی دو مرحله ای برای حذف نوسان بار در جرثقیل سقفی سید عنایت اله ،علوی // سید عنایت اله علوی (Sequential two step fuzzy controller for overhead crane) / Информационные технологии в промышленности : сборник тезисов второй научной конференции Иранских студентов, проживающих в Беларуси, г. Минск, 4 апреля 2008. – С. 18–23
20. بهینه سازی سازی کنترل کننده فازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک سید عنایت اله ،علوی (Fuzzy controller with genetic algorithm) / سید عنایت اله علوی // Информационные технологии в промышленности : сборник тезисов второй научной конференции Иранских студентов, проживающих в Беларуси, г. Минск, 17 апреля 2009. – С. 21–23
21. Петренко, Ю.Н. Имитационная трехмерная модель мостового крана с контроллером нечеткой логики / Ю.Н. Петренко, С.Э. Алави, С.В. Александровский // Автоматизации технологических процессов : сборник тезисов Международной научно-технической конференции, г. Минск, 2011. – С. 123–124.

РЭЗІЮМЭ

Алаві Сейед Энаяталлах

Сістэма гашэння ваганняў грузу пад'ёмных кранаў на аснове метадаў невыразнай логікі

Ключавыя словы: электрапрывод, маставы кран, гашэнне ваганняў грузу, кантролер электрапрывода, невыразная логіка.

Мэта работы заключаецца ў распрацоўцы структур, алгарытмаў і метадаў сінтэзу і аналізу кантролера невыразнай логікі электрапрывода каляскі маставага крана, што дазваляе зменшыць колькасць ваганняў і, тым самым, павысіць эфектыўнасць кіравання механізмам.

Аб'ектам даследавання з'яўляецца электрапрывод каляскі маставага крана.

Прадмет даследавання – сістэма бескалябальнага кіравання электрапрыводам.

Метады даследаванняў грунтуюцца на аснове апарата невыразнай логікі. Даследаванні дынамічных характарыстык выканання на аснове тэорыі аўтаматычнага кіравання на імітацыйных мадэлях з выкарыстаннем тыпавага праграмнага прадукту Matlab/Simulink.

Атрыманыя вынікі і іх навізна

Распрацавана метадыка і даследаваны паказчыкі бескалябальнага кіравання электрапрыводам каляскі маставага крана з ужываннем тэорыі грубага набору. Створана структура кантролера і алгарытм яго функцыянавання на аснове апарата невыразнай логікі. Удасканалены матэматычныя мадэлі кіравання электрапрыводам каляскі маставага крана з кантролерам невыразнай логікі. Распрацавана метадыка праектавання кантролера невыразнай логікі з прымяненнем генетычных алгарытмаў. Распрацавана метадыка і праведзена ацэнка параметраў кантролера невыразнай логікі. Атрыманыя вынікі спрыяюць больш абгрунтаванаму праектаванню кантролера невыразнай логікі з прымяненнем генетычных алгарытмаў.

Практычная значнасць работы заключаецца ў стварэнні інжынерных метадык праектавання кантролера невыразнай логікі, у тым ліку з прымяненнем генетычных алгарытмаў, для бескалябальнага кіравання электрапрыводам каляскі маставага крана. Асноўныя вынікі тэарэтычных даследаванняў і імітацыйнага мадэлявання выкарыстаны ў навучальным працэсе кафедры «Электрапрывод і аўтаматызацыя прамысловых устаноў і тэхналагічных комплексаў» БНТУ.

РЕЗЮМЕ

Алави Сейед Энаяталлах

Система гашения колебаний груза подъемных кранов на основе методов нечеткой логики

Ключевые слова: электропривод, мостовой кран, гашение колебаний груза, контроллер электропривода, нечеткая логика.

Цель работы заключается в разработке структур, алгоритмов и методов синтеза и анализа контроллера нечеткой логики электропривода тележки мостового крана, что позволяет уменьшить число колебаний и, тем самым, повысить эффективность управления механизмом.

Объектом исследования является электропривод тележки мостового крана.

Предмет исследования – система бесколебательного управления электроприводом.

Методы исследований базируются на основе аппарата нечеткой логики. Исследования динамических характеристик выполнены на основе теории автоматического управления на имитационных моделях с использованием типового программного продукта Matlab/Simulink.

Полученные результаты и их новизна

Разработана методика и исследованы показатели бесколебательного управления электроприводом тележки мостового крана с применением теории грубого набора. Создана структура контроллера и алгоритм его функционирования на основе аппарата нечеткой логики. Усовершенствованы математические модели управления электроприводом тележки мостового крана с контроллером нечеткой логики. Разработана методика проектирования контроллера нечеткой логики с применением генетических алгоритмов. Разработана методика и проведена оценка параметров контроллера нечеткой логики. Полученные результаты способствуют более строго обоснованному проектированию контроллера нечеткой логики с применением генетических алгоритмов.

Практическая значимость работы заключается в создании инженерных методик проектирования контроллера нечеткой логики, в том числе с применением генетических алгоритмов, для бесколебательного управления электроприводом тележки мостового крана. Основные результаты теоретических исследований и имитационного моделирования использованы в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» БНТУ.

SUMMARY
Alavi Seyed Enayatallah

**Swing free controller of the bridge crane electric drive system
based on Fuzzy logic**

Key words: electric drive system, overhead crane, control system, fuzzy logic controller, genetic algorithm.

The work purpose consists in working out of structures, algorithms and methods of synthesis and the analysis of Fuzzy logic controller of the electric drive of the overhead crane cart that allows to reduce number of membership functions and, thereby, to raise management efficiency the mechanism.

Object of research is the electric drive of the cart of the bridge crane.

A subject of research – system swing-free control of the bridge crane electric drive.

Methods of researches are based on a basis of the theory of Fuzzy logic. Researches of dynamic characteristics are executed on the basis of the automatic control theory on imitating models with use of typical software product Matlab/Simulink.

The received results and their novelty.

The technique is developed and indicators swing-free control of the electric drive of the cart of the bridge crane with application of the theory of a rough set are investigated. The structure of the Fuzzy logic controller and its algorithm created. Cart of the bridge crane Fuzzy logic control electric drive system simulation model is improved. The technique of designing of Fuzzy logic controller with application of genetic algorithms is developed. Genetic algorithm based Fuzzy logic controller parameters design developed.

The practical importance of work consists in creation of engineering techniques of designing of the Fuzzy logic controller, based on genetic algorithms theory, for swing-free control of the bridge crane electric drive.

The basic results of theoretical researches and simulation modeling are used in educational process of chair «Electric drive systems and automation of plants and technological complexes» BNTU.

Научное издание

Алави Сейед Энаяталлах

**СИСТЕМА ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУЗА
ПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ
НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Подписано в печать 25.05.2011.
Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,34. Уч.-изд. л. 1,04. Тираж 90. Заказ 511.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.
Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.