

УДК 519+681

© 2009 г. **О.С. Амосов**, д-р техн. наук,  
**Л.Н. Амосова**

(Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет,  
Комсомольск-на-Амуре),

**С.Н. Иванов**, канд. техн. наук

(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)

## **СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИМ КОМПЛЕКСОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ**

Рассмотрен синтез оптимальных систем управления с использованием технологий нечеткого вывода для нового класса электромеханических теплогенерирующих комплексов. Дан пример построения для теплогенератора нечеткого регулятора с двумя входами и двумя выходами, с использованием алгоритмов Мамдани и Сугено. Приведены результаты моделирования нечеткого регулятора.

**Ключевые слова:** электромеханический теплогенерирующий комплекс, оптимальная система управления, нечеткий логический регулятор, нечеткая система вывода, алгоритмы Мамдани и Сугено.

### **Введение**

В настоящее время одним из приоритетных направлений в развитии науки, технологий и техники ведущих промышленных стран и России является энергетика и энергосбережение. Производство, передача и эффективное использование тепловой энергии являются необходимыми условиями обеспечения регулируемых климатических условий для комфортной и полноценной жизнедеятельности современного человека независимо от места его нахождения. Актуальность рассматриваемых в данной работе задач вызвана необходимостью повысить эффективность производства и учет тепловой энергии, улучшить технико-экономические и эксплуатационные показатели бытовых и промышленных устройств электронагрева, отвечающих требованиям электробезопасности, надежности и технологичности.

Существует достаточно много типов теплогенераторов (ТГ), различающихся принципами построения, конструкциями, режимами работы и технико-экономическими показателями [1]. Среди современных разработок теплогенерирующих комплексов можно выделить новый, перспективный класс электромеханических теплогенераторов (ЭМТ) [2 – 11] на основе электромеханического пре-

образователя (ЭМП).

В данной статье в качестве объекта для исследования и управления и выбран указанный класс ЭМТ. Для дальнейшего повышения их эффективности требуется разработка и исследование современных оптимальных и субоптимальных систем управления (СУ), образующих с ЭМТ единую замкнутую систему – оптимальный электромеханический теплогенерирующий комплекс (ЭМТК).

Отсутствие разработок систем управления для нового класса ЭМТ обуславливает необходимость их синтеза и определяет актуальность темы исследования. Наиболее современные СУ строятся в настоящее время с использованием методов искусственного интеллекта (ИИ), в частности – синтезу СУ с использованием одной из технологий ИИ-систем, созданных на основе нечетких множеств [4, 12–15].

### Постановка задачи управления ЭМТ

Известный принцип разделения для нелинейных систем дает субоптимальное решение для управления в виде соединения системы оптимального оценивания и системы оптимального управления, синтезированной для детерминированных условий [16, 17]. С учетом сказанного схема оптимального ЭМТК представлена на рис. 1, где ЭМТ – объект управления; СИ – система измерений; ОНФ – оптимальный нелинейный фильтр; ДОР – детерминированный оптимальный регулятор; СУ – статистически оптимальная система управления, формирующая входные сигналы управления ЭМТ  $u$ .

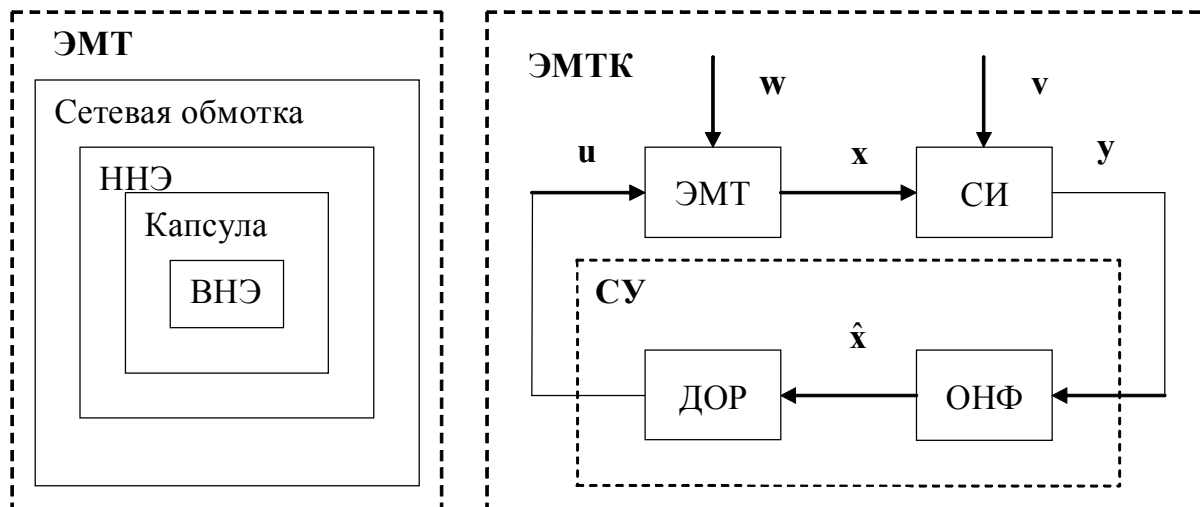


Рис. 1. Структурная схема оптимального ЭМТК.

ЭМТ состоит из магнитопровода, с размещенной на нем сетевой обмоткой, и разделенных нагревательных элементов [3, 11]. Вращающийся нагревательный элемент (ВНЭ) в виде короткозамкнутой вторичной обмотки, выполненной из электропроводящего материала, фиксируется капсулой, выполненной из самосмазывающегося антифрикционного материала на основе эпоксидного компаунда. Неподвижный нагревательный (теплогенерирующий) элемент (ННЭ) из электропроводящего материала установлен между сетевой и вторичной обмотками.

Для увеличения электрического и теплового сопротивления наружная поверхность ННЭ изолируется слоем изоляционного материала. Теплоотдача производится с двух поверхностей: с внутренней поверхности ННЭ и поверхности вращающейся вторичной обмотки, что обеспечивает повышение теплопроизводительности в номинальных режимах работы ЭМТ.

Выходные параметры ВНЭ, ННЭ и сетевой обмотки образуют  $n$ -мерный вектор состояния  $\mathbf{x}$  и контролируются с помощью системы измерений, учитывающей изменение внешних и/или внутренних воздействующих факторов и включающей комплект первичных датчиков, – например, температуры, давления, линейного или углового перемещения. При изменении любого из выходных параметров система измерений фиксирует ее отклонение от требуемой величины с учетом значений случайных  $l$ -мерного вектора  $\mathbf{w}$  и  $m$ -мерного вектора  $\mathbf{v}$ , формируя  $m$ -мерный вектор измерений  $\mathbf{y}$ , поступающий на систему управления СУ. СУ формирует для ЭМТ входной  $r$ -мерный вектор управляющих сигналов  $\mathbf{u}$ , обеспечивая регулирование энергетических параметров сетевой обмотки – напряжения и частоты.

Сформулируем задачу оптимального управления. Необходимо синтезировать статистически оптимальную систему управления, формирующую входные сигналы управления ЭМТ  $\mathbf{u}$ , минимизирующие заданный критерий качества поведения всей системы  $E$ .

В данной работе рассматривается решение задачи построения ДОР с использованием теории систем нечеткого вывода при условии, что ОНФ уже синтезирован. Для удобства в дальнейшем примем  $\mathbf{z} \equiv \mathbf{x}$ .

### Построение регулятора для ЭМТ

В классической теории регулирования широкое распространение получило использование ПИД-регулятора, параметры которого выбираются исходя из заданных показателей качества регулирования (время регулирования, перерегулирование, затухание переходных процессов).

Другой традиционный вариант построения ДОР может быть осуществлен с использованием математических моделей ЭМТ и СИ [4, 17].

Проектирование ДОР с помощью классических подходов требует построения математической модели, учитывающей столь большое число параметров, что результирующий регулятор оказывается сложным и дорогим. В работе [3] представлена математическая модель ЭМТ, в которой независимые переменные (напряжения) и зависимые переменные (токи и частота вращения) связаны нелинейной зависимостью, обусловленной характеристикой ферромагнитных материалов и температурой. Она сложна и однозначно свидетельствует о целесообразности применения для синтеза СУ для ЭМТ интеллектуальных подходов.

Поэтому в настоящей работе для построения ДОР предлагается использовать системы нечеткого вывода. Нечеткие регуляторы (НР), построенные на этой основе, способны обеспечить более высокие показатели качества процессов управления по сравнению с классическими регуляторами. Кроме того, использование нечетких алгоритмов управления позволяет оптимизировать сложные кон-

туры регулирования без проведения объемных математических исследований.

*Нечеткий регулятор.* Выделяя аналогично [15] следующие типовые структуры нечетких СУ, – с включением НР в структуру СУ вместо четкого регулятора; двухуровневую СУ с четким регулятором на нижнем исполнительном уровне и на верхнем – с НР, с помощью которого осуществляется настройка параметров четкого регулятора; нечеткой СУ для решения многокритериальной задачи, где с помощью НР обеспечивается выбор компромисса между различными критериями управления; нечеткой СУ с эталонной моделью, – отметим, что в данной статье выбрана первая структура нечеткой системы управления.

Структурная схема нечеткого логического регулятора приведена на рис. 2. Он содержит блок фаззификации, блок дефаззификации, машину нечеткого вывода и базу знаний, состоящую из базы правил и базы данных. В последней содержатся обучающие примеры, критерии управления, вид и параметры функции принадлежности.

Нечетким регулятором должно быть реализовано (неизвестное) отображение  $\mathbf{u}^{(j)} = \mathbf{f}(\mathbf{z}^{(j)}) = \mathbf{f}(z_1^{(j)}, z_2^{(j)}, \dots, z_n^{(j)})$ ,  $j = 1, \dots, J$ , при наличии обучающего множества  $\{(\mathbf{z}^1, \mathbf{u}^1), \dots, (\mathbf{z}^J, \mathbf{u}^J)\}$ .

Введение критерия оптимальности в виде функции ошибки для  $j$ -го предъявленного образца вида  $E_j = \frac{1}{2} \|\mathbf{u} - \mathbf{u}^{(j)}\|^2$  позволяет далее, как в обычных нейронных сетях [13], использовать градиентный метод оптимизации для подстройки параметров нечеткого регулятора (параметров заданных предикатных правил).

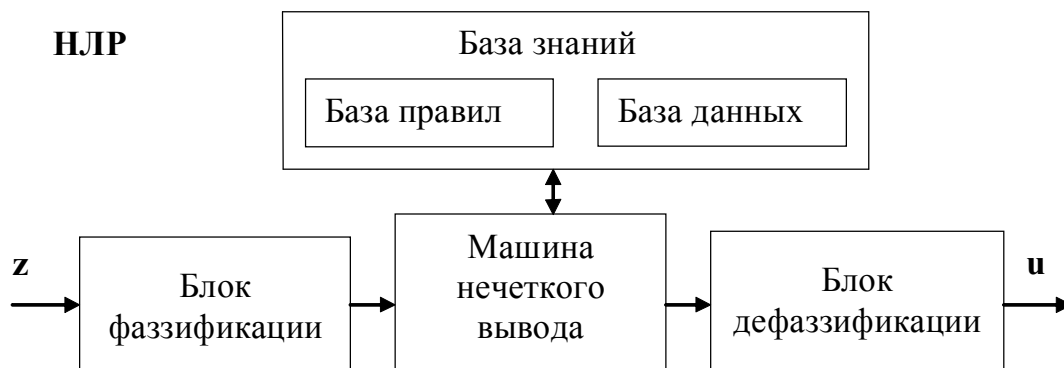


Рис. 2. Структурная схема нечеткого логического регулятора.

Основными этапами нечеткого вывода согласно [14] являются:  
 формирование базы правил систем нечеткого вывода;  
 фаззификация входных переменных;  
 агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций;  
 активизация или композиция подзаклучений в нечетких правилах продукций;  
 аккумуляирование заключений нечетких правил продукций;  
 дефаззификация.  
 Фаззификация – установление соответствия между конкретным значением

отдельной входной переменной системы нечеткого вывода и значением функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной. Агрегирование – процедура определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода. Активизация – процедура, или процесс нахождения степени истинности каждого из подзаключений правил нечетких продукций. Аккумуляирование – процедура, или процесс нахождения функции принадлежности для каждой из выходных лингвистических переменных. Дефаззификация – процедура, или процесс нахождения обычного (не нечеткого) количественного значения для каждой из выходных лингвистических переменных.

При формировании базы правил нечетких продукций необходимо определить: множество правил нечетких продукций  $\mathbf{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_\eta\}$ , множество входных лингвистических переменных  $\mathbf{Z} = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$  и множество выходных лингвистических переменных  $\mathbf{U} = \{U_1, U_2, \dots, U_r\}$ . Тем самым база правил нечетких продукций считается заданной, если заданы множества  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{Z}$ ,  $\mathbf{U}$ . Заметим, что в рассматриваемой задаче множество входных лингвистических переменных  $\mathbf{Z} = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$  представляет вектор измерений  $\mathbf{z}$ , а множество выходных лингвистических переменных  $\mathbf{U} = \{U_1, U_2, \dots, U_r\}$  – вектор управляющих сигналов  $\mathbf{u}$ .

Соответствующая база правил состоит из набора нечетких «Если-То» правил в следующей форме:  $R_k : \text{если } \mathbf{z} \text{ есть } \mathbf{A}_k, \text{ то } \mathbf{u} \text{ есть } \mathbf{B}_k, k = \overline{1, \eta}$ , где  $\mathbf{z}$  – входной и  $\mathbf{u}$  – выходной векторы для НР;  $\mathbf{A}_k = A_{k1} \times \dots \times A_{kn}$  – нечеткие множества, заданные на декартовом произведении  $\mathbf{X}$  универсальных множеств входных лингвистических переменных и имеющие функции принадлежности  $\mu_{A_{ki}}(z_i), k = \overline{1, \eta}, i = \overline{1, n}$ ;  $\mathbf{B}_k = B_{k1} \times \dots \times B_{kr}$  – нечеткие множества, заданные на декартовом произведении  $\mathbf{Y}$  универсальных множеств выходных лингвистических переменных и имеющие функции принадлежности  $\mu_{B_{ki}}(u_i), k = \overline{1, \eta}, i = \overline{1, r}$ ;  $\eta$  – общее число нечетких «Если-То» правил в базе правил.

Основными алгоритмами нечеткого вывода являются: алгоритм Мамдани, алгоритм Цукамото, алгоритм Ларсена, алгоритм Сугено, упрощенный алгоритм нечеткого вывода.

Автоматизация непосредственного процесса синтеза и настройки термов, функций принадлежности и правил нечеткого регулятора ЭМТ позволяет производить настройку и синтез регулятора на основе задания критериев качества управления (т.е. не имея полной информации об объекте управления).

В процессах управления ЭМТ нечеткие принципы регулирования используются для обеспечения температуры как основного эксплуатационного параметра, определяющего выходные характеристики ТГ. НР имеет, как правило, не менее двух входов. На один вход подается сигнал, пропорциональный температуре, что определяется как принципом построения системы управления процессом в ЭМТ, так и конструктивными параметрами ЭМТ. На другой вход подается сигнал, пропорциональный производной температуры ТГ.

*Способы составления правил* нечеткого управления для ЭМТК [15]: на основе опыта и знаний эксперта; путем создания модели действия оператора; путем обучения (моделирование и – если возможно – эксперимент на реальном оборудовании).

*Способы определения параметров регулятора* для ЭМТК [15]:

настройка на основе желаемого переходного процесса (первоначально настраивают регулятор приближенно, затем, меняя границы нечетких множеств и параметры блока правил, добиваются совпадения заданного и желаемого переходных процессов);

настройка на основе эталонных фазовых траекторий (желаемое качество процесса управления задается в виде области допустимых фазовых траекторий, а при нарушении границ области меняют параметры регулятора);

возможна настройка параметров нечетких регуляторов с помощью генетических алгоритмов;

параметры регулятора Сугено-Такаги можно определить на основе нейронечеткого подхода, с использованием адаптивной нейронечеткой сети.

### **Пример моделирования нечеткого регулятора для ЭМТ**

*Параметры ЭМТ.* Мощность ЭМТ лежит в диапазоне от 2.2 до 3 кВт.

*Цель управления:* поддерживать температуру в комфортном диапазоне, например:  $+22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ .

Теплогенератор предназначен для создания комфортных условий при возможном изменении температуры окружающего воздуха ниже  $18^{\circ}\text{C}$ , – например, в диапазоне  $-50^{\circ}\text{C} \dots +18^{\circ}\text{C}$ . График зависимости температуры воздуха изменяется наиболее существенно в течение года и в меньшей степени – в течение суток. Время нарастания (убывания) температуры соответствует разным временным отрезкам, но в любом случае соответствует инерционной системе, что позволяет достаточно точно описать физические процессы, требующие воздействия со стороны системы управления.

Поскольку основная цель разработки автоматизированной системы управления заключается в повышении эффективности функционирования ЭМТ за счет энергосберегающих технологий в максимальной степени обеспечиваемых нечеткими системами, то рассматриваемая задача может быть решена за счет регулирования первичных параметров питающей сети (напряжение, частота) в зависимости от текущей температуры окружающей среды и ее производной с требуемой дискретностью. При этом необходимо учитывать, что процессы в самом ТГ также характеризуются существенной тепловой постоянной времени. Поэтому системой регулирования должен учитываться прогноз того, что будет происходить с окружающей температурой после рассматриваемого момента времени при изменении параметров ТГ. Предположим, что температура воздуха ниже требуемой величины, – соответственно это требует включения ТГ с целью ее повышения. По мере приближения к заданному значению температуры воздуха температура ТГ должна регулироваться таким образом, чтобы температура воздуха не превысила требуемой величины. Фактически система управления должна обеспечить такой

процесс теплообмена, при котором скорость изменения температуры активных частей ТГ должна стать нулевой в момент достижения заданной температуры окружающей среды при номинальной производительности теплогенератора (скорости перемещения хладагента внутри ТГ).

Эвристические правила, описывающие поведение управляемой теплогенерирующей системы в предположении, что максимально теплая температура соответствует номинальной и при использовании в качестве нечеткого вывода алгоритма Мамдани, записываются в нижеследующем виде.

1. Если температура окружающей среды максимально холодная, а скорость ее изменения отрицательна или равна нулю, то следует подать на обмотку ТГ максимальное напряжение максимальной частоты.

2. Если температура окружающей среды максимально теплая, а скорость ее изменения отрицательна, то следует подать на обмотку ТГ минимальное напряжение минимальной частоты.

3. Если температура окружающей среды максимально теплая, а скорость ее изменения положительна или равна нулю, то следует отключить ТГ от сети.

4. Если температура окружающей среды холодная, а скорость ее изменения отрицательна, то следует подать на обмотку ТГ максимальное напряжение номинальной частоты.

5. Если температура окружающей среды теплая, а скорость ее изменения отрицательна, то следует подать на обмотку ТГ минимальное напряжение номинальной частоты.

6. Если температура окружающей среды максимально холодная, а скорость ее изменения положительна, то следует подать на обмотку ТГ номинальное напряжение максимальной частоты.

7. Если температура окружающей среды холодная, а скорость ее изменения положительна или равна нулю, то следует подать на обмотку ТГ номинальное напряжение номинальной частоты.

8. Если температура окружающей среды теплая, а скорость ее изменения положительна или равна нулю, то следует подать на обмотку ТГ номинальное напряжение минимальной частоты.

Эта информация может быть положена в основу базы нечетких лингвистических правил.

*База нечетких лингвистических правил.* Для формирования базы правил нечеткого вывода предварительно необходимо определить входные и выходные лингвистические переменные. В качестве первой входной лингвистической переменной берется температура окружающего воздуха  $T$  – «температура воздуха», а второй –  $Td$  – «скорость изменения температуры»; в качестве выходных лингвистических переменных выбираются  $u$  – «напряжение» и  $f$  – «частота». Этим лингвистическим переменным могут соответствовать лингвистические значения:  $V$  – максимальное;  $C$  – холодное;  $N$  – отрицательное;  $Z$  – равное нулю;  $W$  – теплое;  $P$  – положительное;  $S$  – минимальное;  $O$  – номинальное. В этом случае система нечеткого вывода будет содержать 8 нечетких правил:

*Правило 1. Если « $T$  есть  $VC$ » и « $Td$  есть  $N$  или  $Z$ », то « $u$  есть  $V$  и  $f$  есть  $V$ ».*

- Правило 2. Если «Т есть ВW» и «Td есть N», то «и есть S и ф есть S».
- Правило 3. Если «Т есть ВW» и «Td есть Р или Z», то «и есть Z и ф есть Z».
- Правило 4. Если «Т есть С» и «Td есть N», то «и есть В и ф есть О».
- Правило 5. Если «Т есть W» и «Td есть N», то «и есть S и ф есть О».
- Правило 6. Если «Т есть ВС» и «Td есть Р», то «и есть О и ф есть В».
- Правило 7. Если «Т есть С» и «Td есть Р или Z», то «и есть О и ф есть О».
- Правило 8. Если «Т есть W» и «Td есть Р или Z», то «и есть О и ф есть S».

При использовании в качестве нечеткого вывода алгоритма Сугено нулевого порядка, та же база правил запишется в виде.

- Правило 1. Если «Т меньше - 25» и «Td меньше 0», то «и равно 250 и ф равно 100».
- Правило 2. Если «Т равна +18» и «Td меньше 0», то «и равно 50 и ф равно 10».
- Правило 3. Если «Т больше +25» и «Td не меньше 0», то «и равно 0 и ф равно 0».
- Правило 4. Если «Т меньше +18» и «Td меньше 0», то «и равно 250 и ф равно 50».
- Правило 5. Если «Т больше +18» и «Td меньше 0», то «и равно 50 и ф равно 50».
- Правило 6. Если «Т меньше - 25» и «Td больше 0», то «и равно 220 и ф равно 100».
- Правило 7. Если «Т меньше +18» и «Td не меньше 0», то «и равно 220 и ф равно 50».
- Правило 8. Если «Т больше +18» и «Td не меньше 0», то «и равно 220 и ф равно 10».

Разработка нечеткой модели регулятора «HeatGenerator» для управления ЭМТ выполнена с использованием системы MatLab.

Результаты моделирования представлены на рис. 3 – 8.

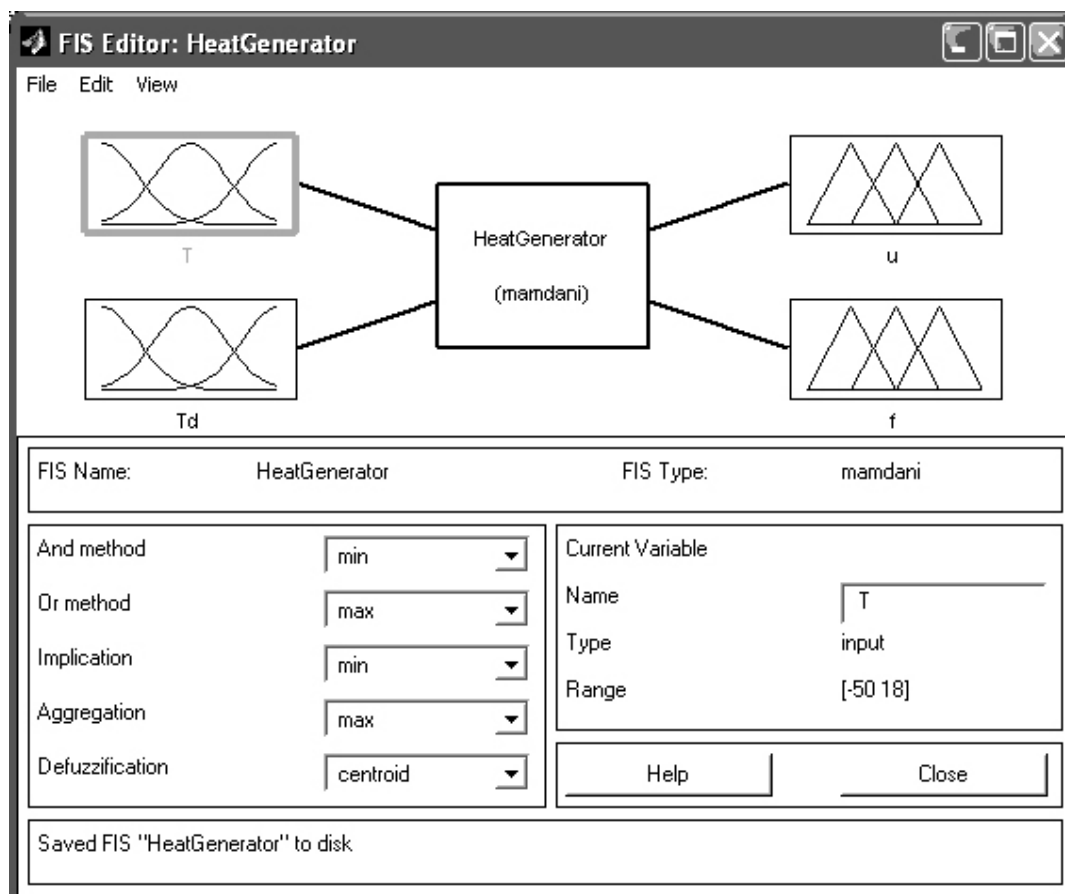


Рис. 3. Определение входных и выходных переменных нечеткого регулятора.



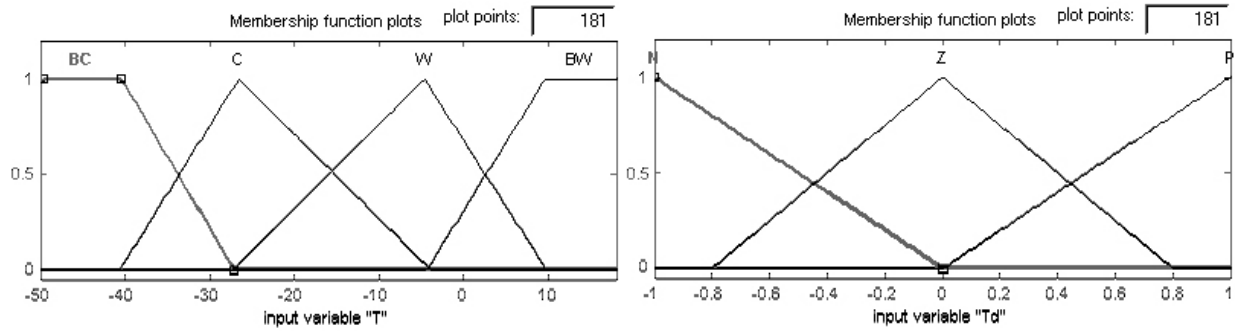


Рис. 4. Функции принадлежности входных переменных T и Td.

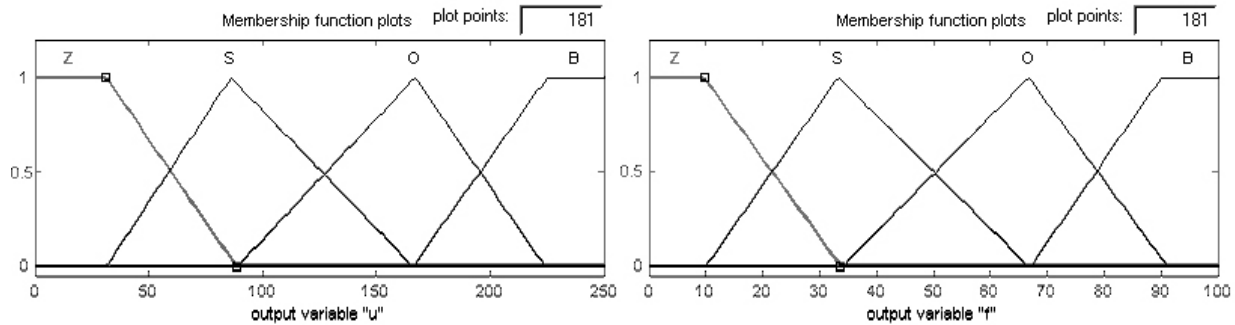


Рис. 5. Функции принадлежности выходных переменных u и f.

1. If (T is BC) and (Td is N) then (u is B)(f is B) (1)
2. If (T is BC) and (Td is Z) then (u is B)(f is B) (1)
3. If (T is BC) and (Td is P) then (u is O)(f is B) (1)
4. If (T is BW) and (Td is N) then (u is S)(f is S) (1)
5. If (T is BW) and (Td is Z) then (u is Z)(f is Z) (1)
6. If (T is BW) and (Td is P) then (u is Z)(f is Z) (1)
7. If (T is C) and (Td is N) then (u is B)(f is O) (1)
8. If (T is W) and (Td is N) then (u is S)(f is O) (1)
9. If (T is BC) and (Td is P) then (u is O)(f is B) (1)
10. If (T is C) and (Td is P) then (u is O)(f is O) (1)
11. If (T is C) and (Td is Z) then (u is O)(f is O) (1)
12. If (T is W) and (Td is P) then (u is O)(f is S) (1)
13. If (T is W) and (Td is Z) then (u is O)(f is S) (1)

Рис. 6. База правил для нечеткого регулятора.

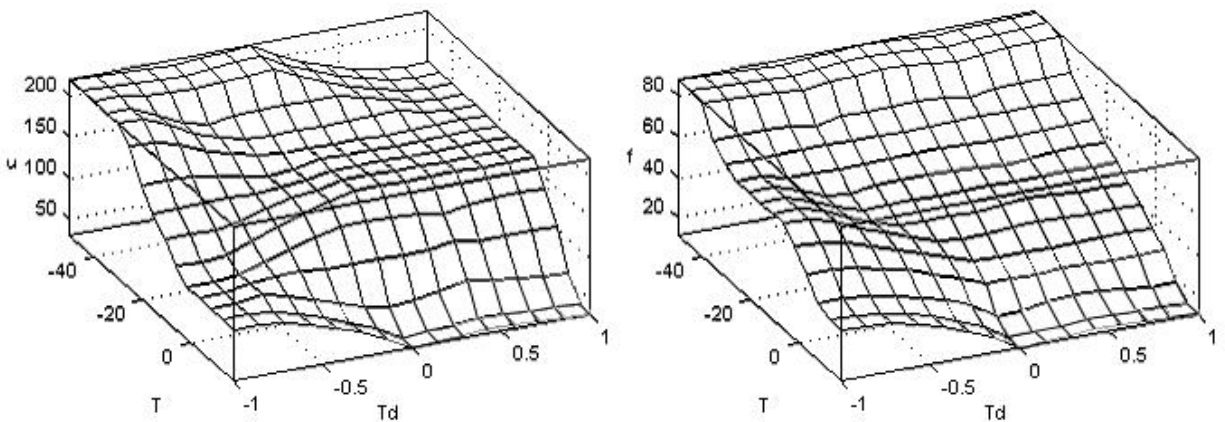


Рис. 7. Визуализация поверхностей напряжения u и частоты f для нечеткого регулятора.

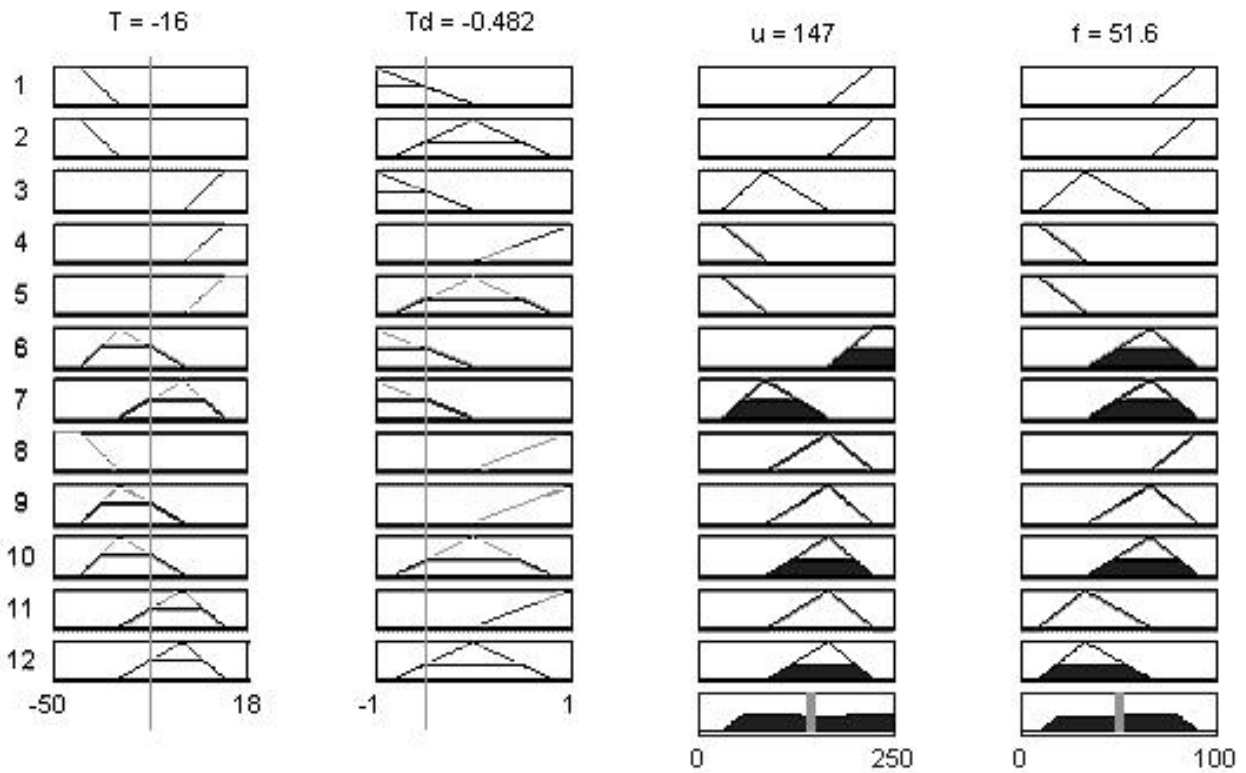


Рис. 8. Просмотр правил после выполнения процедуры нечеткого вывода для значений входных переменных.

Установление зависимости для напряжения  $u$  и частоты  $f$  является, по сути, решением задачи, известной в классической теории управления как задача синтеза управляющих воздействий. При этом для представленного решения задачи были использованы средства нечеткой логики и теории нечетких множеств.

### Заключение

Предложенный в статье подход к синтезу оптимальных систем управления позволяет построить новый класс высококачественных оптимальных нелинейных электромеханических теплогенерирующих комплексов. Построение систем управления на основе технологий нечеткого вывода дает существенно более простое решение при требуемом качестве процессов управления.

Анализ литературы и практика использования нечетких систем управления показывают, что они обладают и лучшими динамическими характеристиками по сравнению с классическими системами. Поэтому перспективным представляется исследование динамических характеристик оптимальных нелинейных электромеханических теплогенерирующих комплексов для рассмотренных выше четырех схем нечетких систем управления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фрадков А.Л. Адаптивная стабилизация минимально-фазовых объектов с векторным входом без измерения производных выхода // Докл. РАН. – 1994. – Т. 337. – №5.

2. Кузьмин В.М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа. – Владивосток: Дальнаука, 2001; Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учеб. пособие для вузов. – СПб: Питер, 2007.
3. Амосов О.С., Иванов С.Н., Еськова А.В. Математическое моделирование устройств генерирования тепловой энергии на основе электромеханического преобразователя с разделенными нагревательными элементами // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Техн. науки. Спец. вып. «Математическое моделирование и компьютерные технологии». – 2006. – С. 32–35.
4. Пащенко Ф.Ф., Амосов О.С., Иванов С.Н. Синтез систем управления электромеханическими преобразователями // Датчики и системы. – 2006. – № 8. – С. 18–22.
5. Пат. на полезную модель 50741 РФ. Управляемый теплогенерирующий электромеханический преобразователь / Ф.Ф. Пащенко, О.С. Амосов, С.Н. Иванов. – 2006. – Бюл. № 16.
6. Пат. на полезную модель 37899 РФ. Управляемый центробежный электромеханический преобразователь / Ю.Г. Кабалдин, А.М. Шпилев, О.С. Амосов, С.Н. Иванов. – 2004. – Бюл. № 13.
7. Пат. на полезную модель 33478 РФ. Тепловые жалюзи / Ю.Г. Кабалдин, А.М. Шпилев, О.С. Амосов, С.Н. Иванов. – 2003. – Бюл. № 29.
8. Пат. на полезную модель 33479 РФ. Управляемый электронагреватель / Ю.Г. Кабалдин, А.М. Шпилев, О.С. Амосов, С.Н. Иванов. – 2003. – Бюл. № 29.
9. Свид. на полезную модель 27755 РФ. Электромеханический преобразователь / А.М. Шпилев, О.С. Амосов, С.Н. Иванов, С.Б. Горбунов. – 2003. – Бюл. № 4 (III ч.). – С. 648.
10. Свид. на полезную модель 27771 РФ. Электронагреватель со звеном автоматического управления / Ю.Г. Кабалдин, А.М. Шпилев, О.С. Амосов, С.Н. Иванов. – 2003. – Бюл. № 4 (III ч.). – С. 656.
11. Иванов С.Н., Амосова Л.Н. Нейросетевые и нечеткие алгоритмы моделирования и управления электромеханических теплогенераторов с собственными вращающимися теплогенерирующими элементами // Сб. тр. V междунар. научно-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – СПб. – 2008. – Т. 12. – С. 443–444.
12. Пивкин В.Я., Бакулин Е.П., Кореньков Д.И. Нечеткие множества в системах управления // <http://www.idisys.iae.nsk.su/fuzzy-book/>.
13. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002.
14. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH.– СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
15. Поляхов Н.Д., Приходько И.А. Нечеткие системы управления: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003.
16. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987.
17. Амосов О.С., Соколов Ю.Н., Олейник В.Н. Синтез статистически оптимальных синтезаторов частот при частично заданной структуре // Автоматизированные системы управления. – Харьков. – 1984. – Вып.5. – С. 87–95.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А.М. Шпилевым.*

*E-mail:*

*Амосов О.С. – [osa18@yandex.ru](mailto:osa18@yandex.ru)*