

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

## ELECTRODYNAMIC REACTOR TEMPERATURE CONTROL SYSTEM

В представленной работе приведено описание системы управления температурными режимами с использованием методов нечеткой логики применительно к электродинамическим каталитическим реакторам. В указанных реакторах в качестве энергоносителя для проведения химических превращений (дегидрирование бутенов и гидрирование пиперилена) используется электромагнитное излучение сверхвысокочастотного диапазона, которое поглощаясь веществом катализатора, трансформируется в тепловую энергию. Такой тип подвода энергии обеспечивает малую инерционность нагрева, так как поглощаемое излучение создает в технологической среде объемные источники тепла, что предъявляет дополнительные требования к быстродействию системы регулирования. Преимуществом системы управления контуром температуры реализованной на основе нечеткого регулятора, когда необходимая точность регулирования достигается подбором вида функции принадлежности, является относительная простота математической реализации алгоритма управления обеспечивающая достаточное быстродействие и допустимое отклонение температуры от заданного значения. Приведены структурная схема контроллера на основе нечеткой логики, лингвистические термы и коэффициенты дефазификации регулятора мощности источника электромагнитного излучения.

This article describes temperature control system with the use of fuzzy logic methods applied to electrodynamic catalytic reactors. These reactors use microwave electromagnetic radiation as an energy carrier for chemical transformations (butene dehydrogenation and piperylene hydrogenation) which is transformed into thermal energy while being absorbed by catalyst agent. This type of energy input provides fast heating response as the absorbed radiation creates extensive heat sources which impose additional requirements for control system response time. Advantage of temperature profile control system based on fuzzy controller with the required control accuracy reached by selecting a type of membership function is relative simplicity of control algorithm mathematical implementation providing sufficient response and permissible temperature deviation from the set-point value. Schematic structure of the controller based on fuzzy logic, linguistic terms and electromagnetic radiation source power regulator defuzzification coefficients are presented.

Шулаева Е.А., Шулаев Н.С.

ФГБОУ ВПО «Уфимский  
государственный нефтяной  
технический университет», филиал  
г. Стерлитамак, Российская  
Федерация

E.A. Shulaeva, N.S. Shulaev

FSBEI of HPE Ufa State Petroleum  
Technological University,  
Sterlitamak branch,  
the Russian Federation

**Ключевые слова:** система управления, нечеткий регулятор, электромагнитное излучение, температура, электродинамический каталитический реактор.

**Key word:** control system, fuzzy controller, electromagnetic algorithm, temperature, электромагнитное излучение, температура, electrodynamic catalytic reactor.

При проектировании технологических процессов с использованием в качестве энергоносителя электромагнитное излучение СВЧ диапазона [1], особое внимание должно уделяться контуру регулирования температуры в реакторе. Это обусловлено, в первую очередь, малой инерционностью СВЧ нагрева, так как в этом случае, реализуется объемный нагрев технологической среды, при котором происходит преобразование энергии электромагнитного излучения в тепловую, что предъявляет дополнительные требования к быстродействию системы регулирования. В данной статье приведено описание системы управления с регулятором температуры на основе нечеткой логики [5, 6, 7] основанной на математической модели электродинамического реактора [3, 4] для технологических процессов дегидрирования бутенов и гидрирования пиперилена.

В ранее опубликованных работах [1] в системе управления электродинамическим реактором было предложено использовать адаптивный регулятор в контуре управления температурой. Недостатком предложенного подхода можно считать весьма сложную математическую реализацию алгоритма управления в контроллере, основанную на решении следующей системы дифференциальных уравнений:

Для твердой фазы (катализатора):

$$c_s \rho_s (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} - \alpha (T_s - T_g) + q_v \quad (1)$$

Для твердой и газовой фазы (углеводороды + газ разбавитель):

$$c_{pg} \rho_g \varepsilon \frac{\partial T_g}{\partial t} + c_s \rho_s (1 - \varepsilon) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} + \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} - c_{pg} Q \frac{\partial T_g}{\partial x} + q_v, \quad (2)$$

где  $c_s, c_{pg}$  – осредненные теплоемкости твердой и газовой фазы, Дж/(кг·К);  $T_s, T_g$  – температура твердой и газовой фазы, К;  $\rho_s, \rho_g$  – осредненные плотности твердой и газовой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  – порозность;  $\lambda_s, \lambda_g$  – эффективная теплопроводность твердого

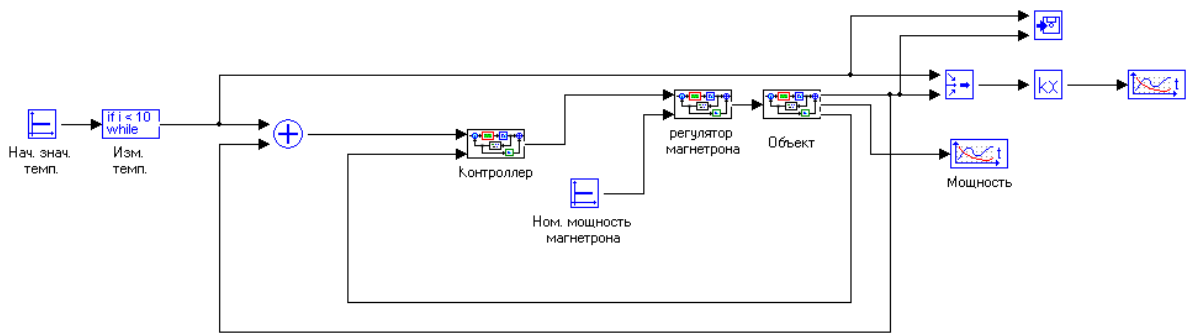


Рисунок 1. Модель управления электродинамическим реактором (контур температуры)

вещества и газа, Вт/(м·К);  $a$  – эффективный объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>3</sup>·К);  $q_v$  – объемная мощность тепловых источников, Вт/м<sup>3</sup>;  $Q$  – массовая скорость потока газовой среды, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Так как решение системы уравнений (1), (2) в общем виде возможно только численными методами, в данной работе предлагается использовать в контуре управления температурой электродинамического реактора регулятор на основе нечеткой логики.

Модель системы управления контуром температуры, реализованная в программном комплексе «Моделирование в технических устройствах» (ПК «МВТУ») [2] на основе нечеткого регулятора, состоит из следующих основных блоков (рисунок 1):

1. Контроллер – реализует основной алгоритм управления на базе нечетких логических выводов;
2. Регулятор магнетрона – формирует выходное значение мощности СВЧ генератора для электродинамического реактора;
3. Объект – реализует физическую модель процесса, протекающего в реакторе, результатом которого является значение температуры, регулируемое мощностью излучения магнетронов и значениями технологических параметров процесса (массы катализатора, объемной скорости подачи, разбавления).

Для реализации модели нечеткого регулятора предложен ряд лингвистических переменных, описывающих как состояние основных параметров реактора, в нашем случае, температуры, так и переменных, определяющих воздействующие параметры работы реактора – мощности. Так для температуры в реакторе предложены 3 лингвистические переменные, которые описывают величину температуры следующими терминами: «высокая», «номинальная», «низкая». Для описания характера изменения температуры в электродинамическом реакторе введены 2 лингвистические переменные: «увеличивается» и «уменьшается».

В качестве функции принадлежности используется функция принадлежности Гаусса  $MF(y)$ :

$$MF(y) = \exp\left[-\left(\frac{y-c}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3)$$

где параметр  $c$  – определяет положение центра функции;  $\sigma$  – параметр ширины функции.

График функции принадлежности для параметра «температура» представлен на рисунке 2.

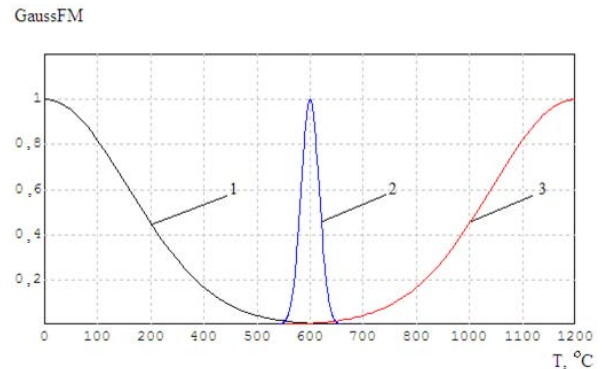


Рисунок 2. Функция принадлежности для  $\sigma$  (200, 20, 200): 1 – Функция принадлежности термина «Низкая» температура ( $c = 0, \sigma = 200$ ); 2 – Функция принадлежности термина «Номинальная» температура ( $c = 600, \sigma = 20$ ); 3 – Функция принадлежности термина «Высокая» температура ( $c = 1200, \sigma = 200$ )

Для описания работы регулятора мощности генератора СВЧ излучения электродинамического реактора введены следующие термы, представленные в таблице 1.

На основании лингвистических переменных, описывающих состояние регулятора мощности, подобраны коэффициенты дефазификации, значение которых представлено в таблице 2. Значение «0» соответствует номинальной мощности, «-I» – отключенному состоянию магнетрона; «+I» – максимальной мощности магнетрона.

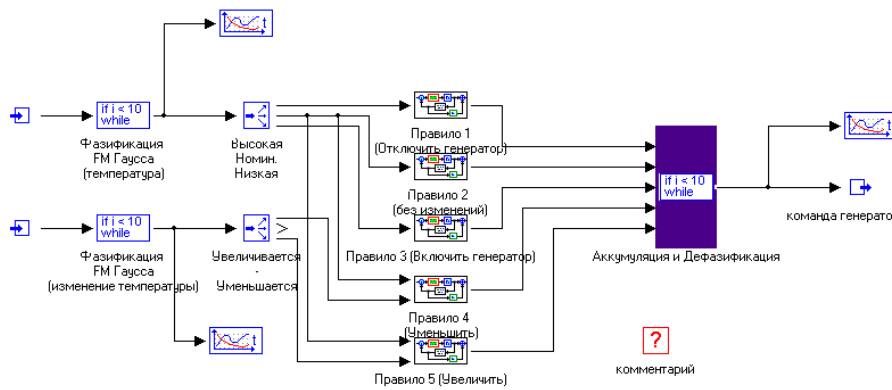


Рисунок 3. Структурная схема контроллера на основе нечеткой логики

Таблица 1. Лингвистические термы регулятора мощности магнетрона

Температура		«Номинальная»	«Высокая»
Изменение температуры	«Низкая»		
«Понижается»	Включить магнетрон макс. мощность	Без изменений	Понизить мощность магнетрона
«Повышается»	Повысить мощность магнетрона	Без изменений	Выключить магнетрон

Рассмотрим подробнее реализацию контроллера, который состоит из ряда блоков, соответствующих этапам нечеткого логического вывода (рисунок 3):

Фазификация – определение параметров истинности значений температуры и изменения температуры с использованием гауссовой функции принадлежности;

Активация – вычисление значения функции принадлежности для каждой лингвистической переменной;

Аккумуляция – определение максимума из произведения каждого терма на функцию принадлежности;

Дефазификация – преобразование нечеткого множества в точное значение мощности магнетрона. В данной работе процесс дефазификации основан на методе определения центра тяжести кривой.

Таблица 2. Коэффициенты дефазификации регулятора мощности магнетрона

Терм	A[i]	B[i]	C[i]
«Отключить магнетрон»	-1,0	-0,9	-0,8
«Понизить мощность магнетрона»	-0,6	-0,5	-0,4
«Без изменений»	-0,1	0	+0,1
«Повысить мощность магнетрона»	+0,4	+0,5	+0,6
«Включить магнетрон на макс. мощность»	+0,8	+0,9	+1,0

В блоке регулятора магнетрона происходит вычисление значения мгновенной мощности СВЧ генератора в зависимости от номинального значения мощности и функции изменения мощности, вычисляемой в блоке управления реактором.

В блоке расчета температуры реализован алгоритм расчета температуры в электродинамическом реакторе на основе математической модели электродинамического реактора. Входным параметром блока является мощность, выходными параметрами – температура, производная температуры, мощность.

Для  $\sigma$  (200, 20, 200) (рисунок 2) среднее относительное отклонение температуры задания и фактической температуры составляет 0,7% (рисунок 4).

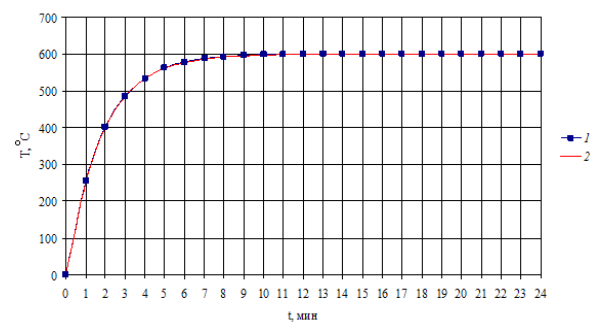


Рисунок 4. Сравнение заданной температуры 1 и температуры, обеспечиваемой контроллером 2 для  $\sigma$  (200, 20, 200)

### Выводы

Таким образом, показана целесообразность применения контроллеров на основе нечеткой логики, когда необходимую точность регулирования можно достичь, изменяя вид функции принадлежности базового терма. Использование системы управления является необходимым шагом для внедрения технологических процессов с использованием СВЧ электромагнитного излучения в современное химическое производство.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ  
ИСТОЧНИКОВ

1. Шулаева Е., Даминев Р., Шулаев Н. Технологические процессы в электродинамических реакторах. Моделирование и системы управления. Germany: изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. 160 с. MBTU. URL: <http://energy.power.bmstu.ru/mvtu/>.
2. Моделирование процесса дегидрирования бутенов в электродинамическом каталитическом реакторе / Шулаева Е.А. [и др.] // Бутлеровские сообщения. 2011. Т.24. №1. С. 99–104.
3. Шулаева Е.А. Моделирование процессов дегидрирования бутенов и гидрирования пиперилена в электродинамических каталитических реакторах: дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2012. 133 с.
4. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators // IEEE Transactions on Computers, vol. 43, No. 11, November 1994. P. 1329-1333.
5. Peter Bauer, Stephan Nouak, Roman Winkler. A brief course in Fuzzy Logic and Fuzzy Control. <http://d.17-71.com/2006/09/27/fuzzy/>.

6. Zadeh L. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. №8. P. 338-353.

REFERENCES

1. E.Shulaeva, R.Daminev,N.Shulaev. Tekhnologicheskie procesy electrodynamicicheskikh reactorakh. Modelirovanie i systemy upravleniya. Izdatel': LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany, ISBN 978-3-659-11692-6, 2012. 160 s.MVTU. URL: <http://energy.power.bmstu.ru/mvtu/>.
2. Modelirovanie protsessa degidirovaniya v electrodynamicicheskome kataliticheskom reactore / ShulaevaE.A. [i dr.]// Butlerovskie soobtsheniya. 2011. T.24. №1. S. 99–104.[inrussian].
3. Shulaeva E.A. Modelirovanie protsessov degidirovaniya butenov i gidirovaniya piperilena v electrodynamicicheskikh kataliticheskikh reactorakh: dis.... cand. tekhn.nauk. Ufa:UGNTU, 2012. 133 s.[in russian].
4. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximators // IEEE Transactions on Computers, vol. 43, No. 11, November 1994. P. 1329-1333.

- 5.Peter Bauer, Stephan Nouak, Roman Winkler. A brief course in Fuzzy Logic and Fuzzy Control.<http://d.17-71.com/2006/09/27/fuzzy/>.

6. Zadeh L. Fuzzysets // Informationand Control. 1965. №8. P. 338-353.

*Шулаева Е.А., канд.техн.наук, доцент кафедры «Автоматизированные технологические и информационные системы» ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация*  
E.A. Shulaeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Chair "Automated Technological and Information Systems", FSBEI of HPE Ufa State Petroleum Technological University, Sterlitamak branch, the Russian Federation

*Шулаев Н.С., д-р техн.наук, проф., зав. кафедрой «Информатика, математика и физика» ФГБОУ ВПО УГНТУ, филиал, г. Стерлитамак, Российская Федерация*  
N.S. Shulaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair "Informatics, Mathematics and Physics", FSBEI of HPE Ufa State Petroleum Technological University, Sterlitamak branch, the Russian Federation  
e-mail:eshulaeva@mail.ru