

УДК 621.311.238

Б. В. Кавалеров, доктор технических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет
И. В. Бахирев, аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКОЙ *

Введение

Задача нечеткого управления газотурбиной установкой (ГТУ) является достаточно известной и имеет большое количество вариантов реализации различной степени сложности. Основным достоинством нечеткой логики является возможность легко формализовать экспертный опыт. ГТУ является сложным нелинейным объектом, поэтому применение нечеткой логики в задачах управления ГТУ является достаточно эффективным. Например, в работе [1] рассматривается нечеткий регулятор (НР) частоты вращения свободной турбины газотурбинного двигателя в сравнении со штатным регулятором. Во всех опытах показатели качества переходных процессов с нечетким регулятором не хуже, а зачастую даже лучше, чем со штатным регулятором частоты вращения. В работе [2] нечеткий регулятор используется в составе системы с предсказателем; для решения задачи оптимизации применяется генетический алгоритм. Как отмечают авторы статьи, нечеткая логика позволяет учесть нелинейные свойства системы, что, в свою очередь, повышает качество управления. Возможность подстройки параметров нечеткого регулятора газотурбинной электростанции (ГТЭС) с помощью заранее обученной нейронной сети изучается в [3]. Нейронная сеть меняет параметры регулятора исходя из момента нагрузки и характера активно-индуктивной нагрузки. Математическое моделирование показывает, что нечеткий регулятор с подстройкой параметров превосходит и НР со статическими коэффициентами, и классический ПИД-регулятор. В статье [4] управляющее воздействие вырабатывает ПИД-регулятор, а нейронечеткая сеть, заранее обученная с помощью генетического алгоритма, осуществляет подстройку его параметров. Таким образом, все сведения о нелинейном характере объекта учитываются благодаря нейронечеткому блоку.

Модель ГТУ

Для проведения исследований используется упрощенная модель ГТУ, полученная с помощью идентификации методом наименьших квадратов [5]. Структура дифференциальных уравнений выбрана с учетом априорной информации об основных физических принципах преобразования энергии в ГТУ. Модель сохраняет допустимую адекватность для работы САУ ГТУ в режиме стабилизации частоты вращения свободной турбины ГТУ от холостого хода до 1,2 номинальной нагрузки.

Уравнения имеют следующий вид [6]:

– уравнение ротора турбокомпрессора

$$\frac{dn_{\text{TK}}}{dt} = (n_{\text{TS}} - n_{\text{TK}}) / T(n_{\text{TK}});$$

– уравнение свободной турбины

$$\frac{dn_{\text{CT}}}{dt} = \frac{1}{n_{\text{CT}} J(n_{\text{CT}})} \left(\left(1 + k_e \frac{dn_{\text{TK}}}{dt} \right) N_E - N_G \right).$$

Здесь n_{CT} – частота вращения свободной турбины (об/мин); n_{TK} – частота вращения турбокомпрессора (об/мин), $T(n_{\text{TK}})$ – постоянная времени турбокомпрессора, зависящая от текущей частоты вращения турбокомпрессора; N_G – мощность нагрузки на валу свободной турбины (кВт); $J(n_{\text{CT}})$ – суммарный приведенный к валу свободной турбины момент инерции. Кроме того, в дополнение к уравнениям (1) и (2) в модель ГТУ входят следующие две нелинейные зависимости: $N_E = f(n_{\text{TK}})$ – нелинейная статическая характеристика, отражающая преобразование частоты вращения турбокомпрессора (об/мин) в мощность свободной турбины (кВт); $n_{\text{TS}} = f(G_{\text{T}})$ – нелинейная статическая характеристика, отражающая преобразование расхода топлива (кг/ч) в обороты турбокомпрессора (об/мин); эти зависимости задаются в виде графиков или таблиц.

Штатный регулятор частоты вращения свободной турбины ГТУ

В режиме стабилизации n_{CT} основную роль играют два регулятора штатной САУ ГТУ: регулятор частоты вращения свободной турбины n_{CT} и регулятор дозатора газа. Регуляторы включаются последовательно.

Передаточная функция регулятора n_{CT} [7]

$$W_{\text{CT}}(p) = k_{\text{П}} \frac{k_i + k_f p}{k_i + p},$$

передаточная функция регулятора дозатора газа

$$W_G(p) = \frac{1 + T_{\text{Д}} p}{p} k_{\text{Д}}.$$

Нечеткий регулятор

В первую очередь рассмотрим наиболее простой ПД-образный нечеткий регулятор. Такой регулятор состоит из трех лингвистических переменных. Входными переменными являются ошибка e , представ-

ляющая собой рассогласование между заданной частотой вращения свободной турбины и текущей частотой вращения, и производная ошибки $\frac{de}{dt}$, а выходной переменной – управляющее воздействие u . Для входных переменных определим термы P, Z, N , что соответствует положительной, нулевой и отрицательной ошибкам и производной ошибки. Для выходной переменной определим термы PB, PS, Z, NS, NB , что соответствует большому положительному, малому положительному, нулевому, малому отрицательному, большому отрицательному значениям выходной переменной. Соответствующие функции принадлежности выберем гауссовыми.

Стратегия управления определяется базой нечетких правил. В виде таблицы база будет выглядеть следующим образом:

База правил нечеткого регулятора

e	$\frac{de}{dt}$		
	N	Z	P
N	NB	NS	Z
Z	NS	Z	PS
P	Z	PS	PB

Поверхность нечеткого преобразования, соответствующая данной базе правил, представлена на рис. 1.

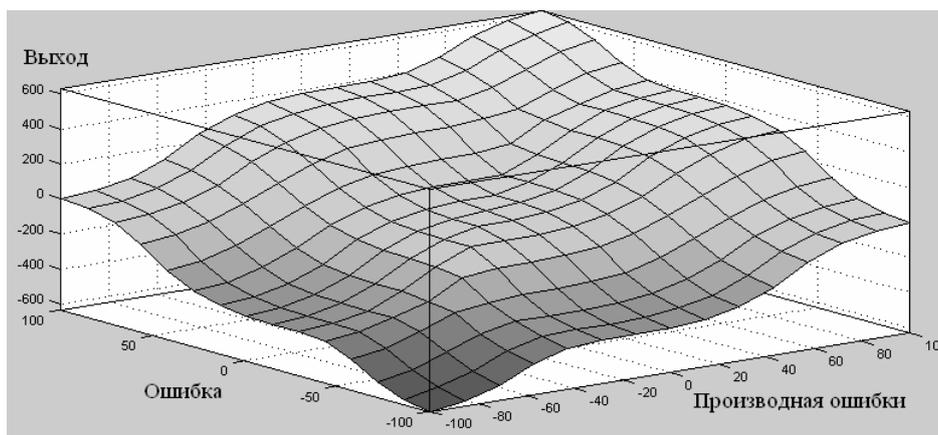


Рис. 1. Поверхность нечеткого преобразования НР

Часто при синтезе нечеткого регулятора входные и выходные переменные приводят в относительных единицах в диапазоне $[-1; 1]$. Для соответствия данных необходимым диапазонам используют масштабирующие коэффициенты, которые могут быть найдены как параметры оптимизации. В данном случае входной и выходной диапазоны нечеткого регулятора были выбраны на основании оценки соответствующих им параметров штатного регулятора. Ошибка и производная изменяются в диапазоне $[-100; 100]$, выходная переменная – в диапазоне $[-600; 600]$. Для соответствия этому диапазону введены блоки ограничения с соответствующими границами.

Выбранный тип нечеткого регулятора – Мадмани, тип дефазификации – центр тяжести. В таком случае выход нечеткого регулятора можно записать в виде [8]

$$y(x) = W^T S(x),$$

где $S(x) = [S_1(x), \dots, S_N(x)]^T$, $W = [W_1, \dots, W_n]^T$,

$$S_j(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{j,i}(x_i)}{\sum_{j=1}^N \left[\prod_{i=1}^n \mu_{j,i}(x_i) \right]}$$

$\mu_{j,i}$ – i -я функция принадлежности правила номер j .

Заменим им штатный регулятор частоты вращения свободной турбины. Структурная схема для этого случая приведена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема с НР

В течение переходного процесса нагрузка меняется следующим образом: в момент времени $t = 1$ нагрузка меняет свое значение с 1260 кВт до 2500 кВт, в момент времени $t = 10$ нагрузка уменьшается с 2500 кВт до 1000 кВт. Приближим ситуацию к реальной, дополнив модель ограничением расхода топлива сверху 1000 кг/ч, что соответствует номинальной нагрузке 2500 кВт, и снизу 100 кг/ч. В течение переходного процесса нагрузка меняется аналогично предыдущему опыту. Графики переходных процессов представлены на рис. 3–5.

Проанализировав рисунки, можно сделать вывод, что при использовании НР максимальное отклонение уменьшилось, а время переходного отличается незначительно, но при более жестких режимах изменения нагрузки НР показывает себя значительно лучше

штатного регулятора. Из рис. 3 становится ясно, что НР более требователен к скорости реакции дозатора газа, чем штатный регулятор.

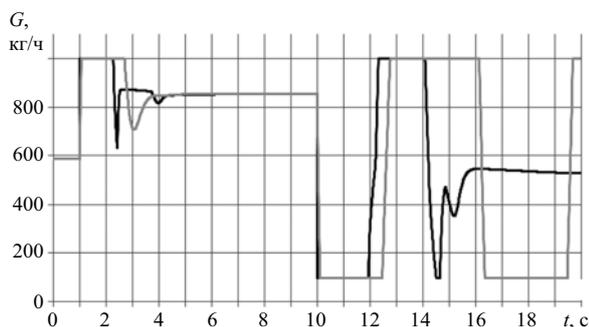


Рис. 3. Расход топлива:
черный – НР, серый – штатный регулятор

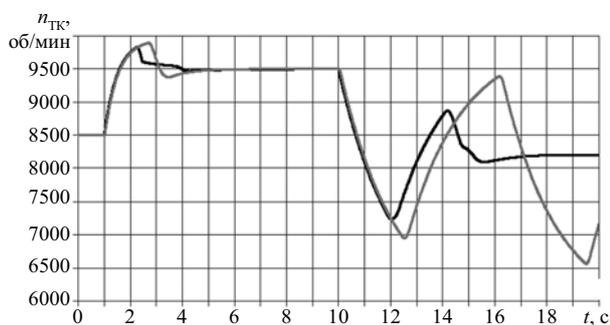


Рис. 4. Частота вращения турбокомпрессора:
черный – НР, серый – штатный регулятор

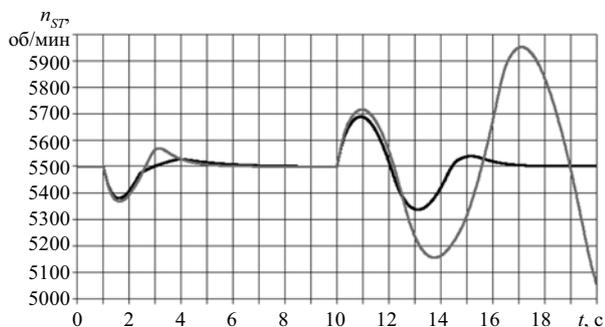


Рис. 5. Частота вращения свободной турбины:
черный – НР, серый – штатный регулятор

Получено 21.05.2016

Выводы

Подводя итог, можно сказать, что использование аппарата нечеткой логики при синтезе регуляторов дает заметные преимущества в сравнении с существующими классическими методами. Несмотря на вышесказанное, отсутствие четких формальных критериев для выбора вида функций принадлежности значительно осложняет синтез таких регуляторов.

Библиографические ссылки

1. Нечеткое управление частотой вращения свободной турбины газотурбинного двигателя / Ю. П. Дудкин, Ю. К. Титов, Р. Г. Филиппенков, Ю. Н. Хижняков // Вестник Московского авиационного института. – 2010. – Т. 17, № 6. – С. 144–152.
2. Saez D., Milla F., Vargas L. S. Fuzzy predictive supervisory control based on genetic algorithms for gas turbines of combined cycle power plants // Energy Conversion, IEEE Transactions on. – 2007. – Vol. 22, No. 3. – Pp. 689–696.
3. Neuro-fuzzy controller for gas turbine in biomass-based electric power plant / F. Jurado, M. Ortega, A. Cano, J. Carpio // Electric Power Systems Research. – 2002. – Vol. 60, No. 3. – Pp. 123–135.
4. Genetic algorithm based neuro-fuzzy network adaptive PID control and its applications / D. Feng, L. Dong, M. Fei, T. Chen // Computational and Information Science. – Springer Berlin Heidelberg, 2005. – Pp. 330–335.
5. Идентификация газоперекачивающего агрегата для модельного испытания и настройки системы управления / Г. А. Килин, Б. В. Кавалеров, И. В. Бахирев, А. Ю. Поварницын // Вестник Воронежского гос. ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2014. – № 1. – С. 65–71.
6. Бахирев И. В., Басаргин Ш. Д., Кавалеров Б. В. Адаптивное управление газотурбинной установкой с эталонной моделью и сигнальной настройкой // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 2(60). – С. 71–76.
7. Там же.
8. Direct adaptive fuzzy control for nonlinear systems with time-varying delays / B. Chen, X. Liu, K. Liu, P. Shi, C. Lin // Information Sciences. – 2010. – Vol. 180, No. 5. – Pp. 776–792.