
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ
НАСТРОЕК АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ
РЕАКТОРА ВВЭР-1000**

© 2016 Х.Ф. Альмасри

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Задача качества регулирования мощности реактора является одной из актуальных в ядерной энергетике. В связи с этим постоянно проводятся исследования систем управления для улучшения качества регулирования мощности реактора. В этом ключе важным представляется исследование моделей интеллектуальных регуляторов мощности в АСУТП ядерных реакторов на многофункциональном компьютерном анализаторе ВВЭР-1000. В данной работе представлена структурная схема для оценки качества регулирования и оптимизации настроек автоматического регулятора мощности реактора ВВЭР-1000, построенная на базе интеллектуальных алгоритмов управления вида нечеткой логики. Задача этой работы заключается в том, чтобы найти оптимальные настройки регулятора и оценить качество регулирования при различных характерах возмущений, где минимальные ошибки регулирования σ и ϵ . В работе показывается, что перспективными вариантами для оптимизации настроек автоматического регулятора мощности являются интеллектуальные алгоритмы управления на базе нечеткой логики.

Ключевые слова: искусственный интеллект, нечеткая логика, оптимизация, ядерный реактор, автоматический регулятор мощности.

Поступила в редакцию 20.11.2016

Достаточно высокая сложность систем регулирования и контроля АСУТП АЭС, а также сложное описание тепловых объектов не позволяют эффективно получать прогнозы качества и настроек системы управления, что определяет целесообразность для рассмотрения нового способа повышения качества управления [1, 2].

Важными задачами проектирования и эксплуатации АСУТП АЭС является оценка качества регулирования и оптимизация настроек автоматического регулятора мощности (АРМ) ядерного реактора. К трудностям решения относится необходимость учета наличия в АСУТП разнообразных управляющих и возмущающих воздействий, которые достаточно сложно предугадать заранее. Кроме того, имеется ряд частных критериев качества и оптимизации, которые связаны между собой и учитываются одновременно. Интеллектуальное, или, по-другому, нечеткое управление, может помочь решить данную задачу для подсистем АРМ [3].

Ниже будет рассмотрен общий подход к решению многокритериальной задачи для выбора оптимальной настройки АРМ и приведены решения частных задач. Для проведения исследований по вопросам показателей качества для регулирования мощности реактора использовался многофункциональный компьютерный анализатор ВВЭР 1000 расположенный в лаборатории управления и контроля кафедры «Автоматика» НИЯУ МИФИ [2]. Компьютерный многофункциональный анализатор реакторной установки АЭС с ВВЭР полностью имитирует работу автоматического регулятора мощности реактора. Это стало основанием для последующего управления мощностью. В связи с этим, все тестирования и эксперименты работы АРМ проводились на данном компьютерном анализаторе, и полученные выходные данные

использовались, в качестве информационной базы, и проверки на соответствие процесса регулирования.

На рисунке 1 представлен интерфейс автоматического регулятора мощности реактора на компьютерном многофункциональном анализаторе реакторной установки исследования АЭС с ВВЭР. На рисунке видны все функциональные параметры регулятора, подлежащие настройке, а так же в этом имитаторе есть возможность ввести различные типы и амплитуды возмущений. Имитатор обладает возможностью визуализировать динамическое состояние системы регулирования в виде графика. На графическом представлении можно наблюдать мгновенное изменение мощности реактора и текущих параметров регулирования.

Следует отметить что, так как имитатор используется для различных целей, таких как научные исследования и проведения учебных работ и практик, есть возможность менять и настраивать множество параметров регулятора, что дает большую возможность проводить разнообразные опыты и испытать нестандартные ситуации.



Рис. 1. – Интерфейс автоматического регулятора мощности реактора на компьютерном многофункциональном анализаторе реакторной установки АЭС с ВВЭР

Автоматический регулятор мощности, используемый в исследуемом анализаторе, позволяет менять настройки следующих параметров:

- K – коэффициент пропорциональности (усиления) АРМ;
- Z – зона нечувствительности АРМ;
- A – тип и характер возмущающего воздействия на ядерный реактор (прирост реактивности).

В таблице 1 представлены значения статической ошибки $Epsilon$ и абсолютные значения величины выброса перерегулирования $Sigma$ для различных допустимых значений параметров настройки регулятора мощности K и Z при различных характерах возмущений ядерного реактора. Из таблицы видно, что при различных типах возмущений по знаку и амплитуде имеют место свои оптимальные, с точки зрения качества регулирования, коэффициенты настройки регулятора K и Z .

Таблица 1. – Результаты оценки качества работы АРМ

К	Z	A ³⁺		A ³⁻	
		<i>sigma</i>	<i>epsilon</i>	<i>sigma</i>	<i>epsilon</i>
0.1	0.1	3.1245	-0.0373	-2.9813	-2.0295
0.1	0.5	3.1689	2.4757	-2.8945	-2.0579
0.1	1	3.1585	2.45	-3.0982	-2.0799
0.1	2	3.1168	1.8589	-3.1753	-2.5982
0.1	3	3.1119	2.4398	-2.809	-2.5305
0.5	0.5	2.8671	0.2226	-2.81	-2.0875
0.5	0.8	2.9187	-0.2512	-2.7019	-2.0427
0.5	1	2.93	-0.2294	-2.6229	-2.068
0.5	1.1	2.9148	0.2969	-2.8585	-2.0418
0.5	1.2	2.9894	0.3255	-2.8949	-2.0098
0.5	1.4	2.8896	0.7209	-2.8401	-2.0971
0.5	1.5	2.9268	0.705	-2.7645	-2.0264
0.5	1.6	2.8698	0.7557	-2.936	-2.5272
0.5	1.8	2.8765	1.1608	-2.8438	-2.0614
0.5	2	2.9266	1.1658	-2.7382	-2.0592
1	0.5	2.5667	0.2537	-2.7085	-2.1162
1	0.8	2.5371	0.2338	-2.561	-2.0879
1	1	2.5369	0.2262	-2.6361	-2.0634
1	1.1	2.525	0.2472	-2.7118	-2.1009
1	1.2	2.583	0.263	-2.6313	-2.0882
1	1.4	2.5863	0.2777	-2.5984	-2.0658
1	1.5	2.5376	0.2355	-2.5112	-2.0496
1	1.6	2.6301	0.3265	-2.6201	-2.0343
1	1.8	2.5163	1.147	-2.5306	-2.0679
1	2	2.5806	1.1514	-2.6874	-2.0945
1.5	0.5	НУ	НУ	НУ	НУ
1.5	0.8	2.3055	0.3227	-2.652	-1.9685
1.5	1	2.102	0.2061	-2.4301	-2.0635
1.5	1.1	2.2134	0.2418	-2.6119	-2.0691
1.5	1.2	2.1846	0.2503	-2.5322	-2.0531
1.5	1.4	2.2276	0.2788	-2.5922	-2.0425
1.5	1.5	2.2355	0.2856	-2.5005	-1.9799
1.5	1.6	2.2972	0.3097	-2.6648	-1.9592
1.5	1.8	2.1464	0.2253	-2.3277	-2.0687
1.5	2	2.1516	0.2407	-2.6218	-2.0571
2	0.5	НУ	НУ	НУ	НУ
2	0.8	НУ	НУ	НУ	НУ
2	1	НУ	НУ	НУ	НУ
2	1.1	2.0448	-1.8507	-2.2268	-2.0485
2	1.2	1.7578	-0.8284	-2.3778	-2.0139
2	1.4	1.873	-0.81	-2.4308	-2.0119
2	1.5	1.8872	-0.7891	-2.4127	-1.9846
2	1.6	2.1222	-0.7674	-2.4686	-1.994
2	1.8	2.0373	-0.8575	-2.4151	-2.0721
2	2	2.0482	-0.8376	-2.4705	-2.054
5	0.1	НУ	НУ	-2.4857	-2.0737
5	0.5	НУ	НУ	-2.4857	-2.0622
5	1	НУ	НУ	-2.2958	-2.0444
5	2	НУ	НУ	-2.4156	-2.838
5	3	2.8925	-2.1259	-2.4212	-2.0983

Более наглядно представлены результаты эксперимента из таблицы 1, которые отражены на рисунке 2 (а, б, в и г) погрешностей работы АРМ (*Epsilon* и *Sigma*) при разных возмущениях A^{3-} и A^{3+}

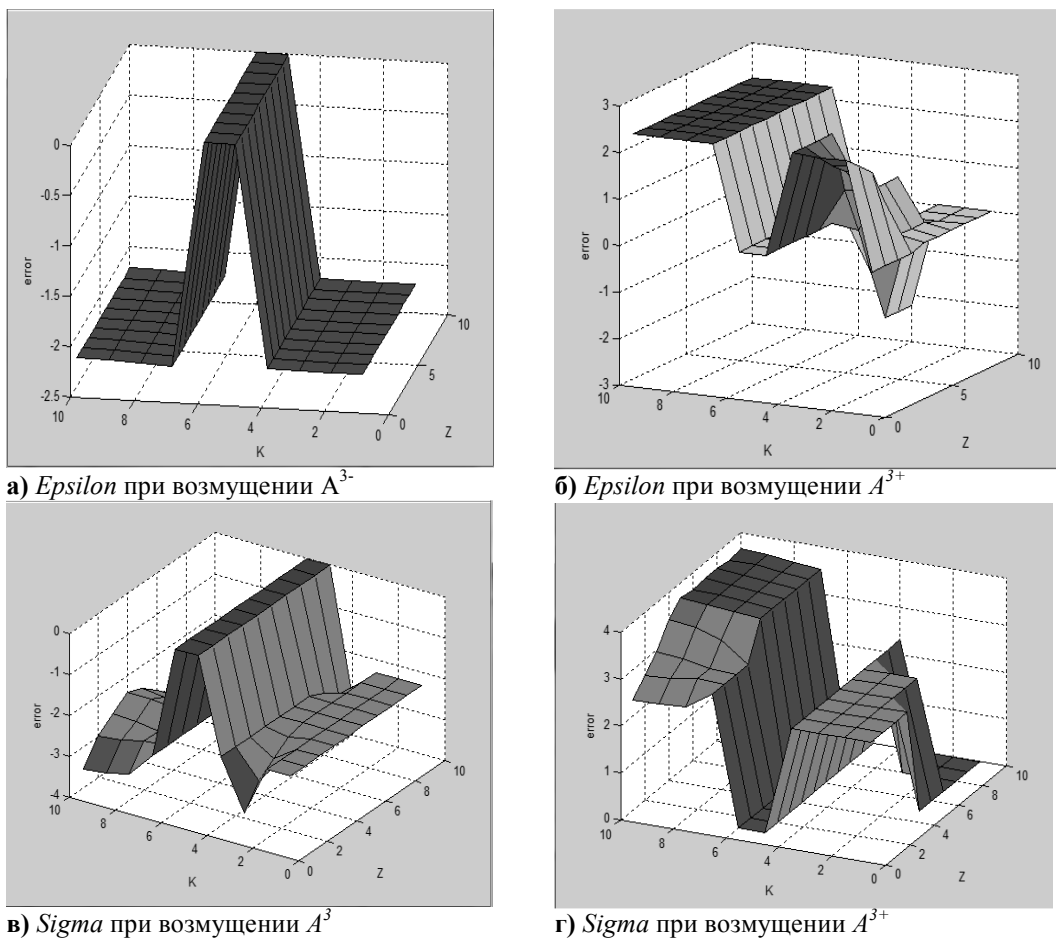


Рис. 2. – Представление погрешностей работы АРМ (*Epsilon* и *Sigma*) при разных возмущениях

В частности из таблицы 1 видна область, где границы устойчивости работы регулятора мощности ЯР. Разумеется, что при штатной работе ЯР практически не удастся достичь границ устойчивости системы регулирования. Но, при нештатных ситуациях, возможны случаи неустойчивой работы системы управления на исследуемом компьютерном анализаторе реактора ВВЭР 1000, На рисунке 3 можно увидеть эту границу.

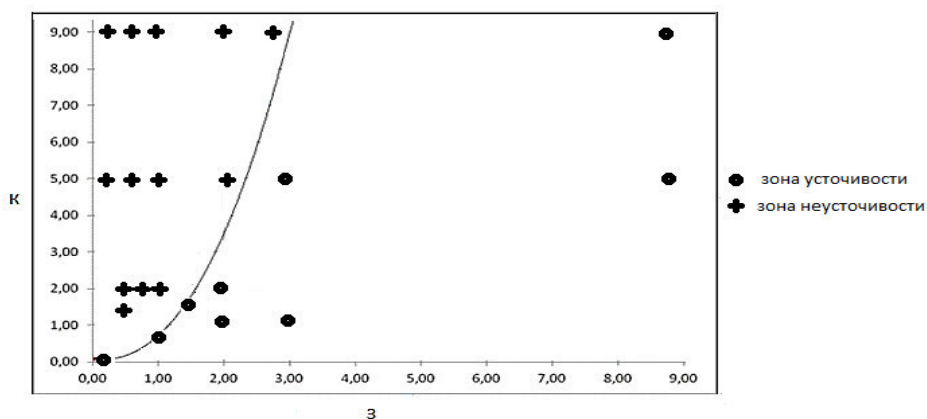


Рис. 3. – Области устойчивой работы АРМ компьютерного анализатора реактора ВВЭР 1000

Из результатов проведенного эксперимента можно сделать вывод, что выбор настроек автоматического регулятора мощности является многокритериальной задачей при учете различных типов возмущений для достижения наилучших показателей *Epsilon* и *Sigma* одновременно.

Перейдем к предлагаемому использованию нечетких оценок для решения многокритериальной задачи выбора оптимальных параметров в регуляторе мощности для достижения наилучших значений *Epsilon* и *Sigma* одновременно при различных типах возмущения. Для этого сформируем предлагаемую нечеткую технологию (метод Fuzzy) ранжирования и оптимизации полученных экспериментальных данных.

Нечеткая технология оптимизации включает выполнение следующих этапов [4]:

- 1) подготовка вариантов схем и исходных данных для оценок надежности вариантов;
- 2) оценка частных критериев оптимизации (ранжирования);
- 3) фазификация частных критериев;
- 4) установление логических правил предпочтения (например, с помощью таблиц правил);
- 5) задание дефазификации;
- 6) нечеткая оценка глобального критерия оптимизации для *Epsilon* и *Sigma*;
- 7) ранжирование вариантов по глобальному критерию оптимизации;
- 8) определение оптимального и запасных вариантов на основе ранжирования;
- 9) окончательный выбор с учетом реализуемости, дополнительных требований и неформальных предпочтений.

Структурная схема нечеткого алгоритма, реализованного с использованием пакета MATLAB, представлена на рисунке 4 и 5. Схема состоит из трех входов, на которые подаются *K*, *Z*, *A* – некоторые известные частные критерии. Эти данные обрабатываются при помощи нечеткого алгоритма Mamdani, который позволяет оценить вклад каждой входной переменной с учетом его веса и накопленного опыта, на этапе создания правил для функционирования многокритериального алгоритма.

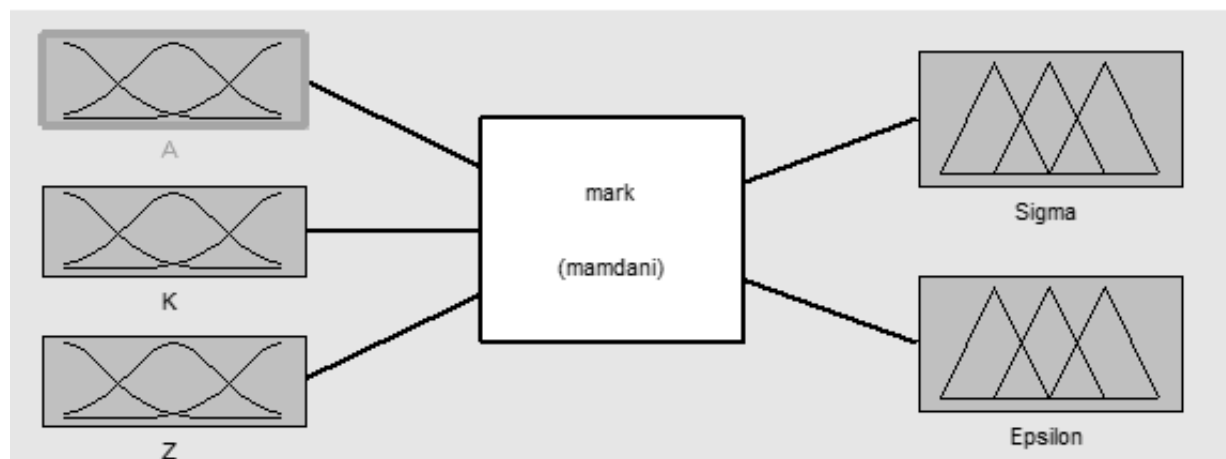


Рис. 4. – Общая схема предлагаемый подход нечеткой логики

Выходы схемы содержат результаты работы алгоритма в виде оценки величин *Epsilon* и *Sigma*. Учитывая, что алгоритм «Mamdani» предлагает всегда положительно определенные оценки, то имеет смысл, в общем случае, для нахождения суммарной оценки использовать среднее арифметическое от оценок *Epsilon* и *Sigma*. В частных случаях интеллектуальный алгоритм позволяет отдавать предпочтение одной из наиболее важных из совокупности оценок.

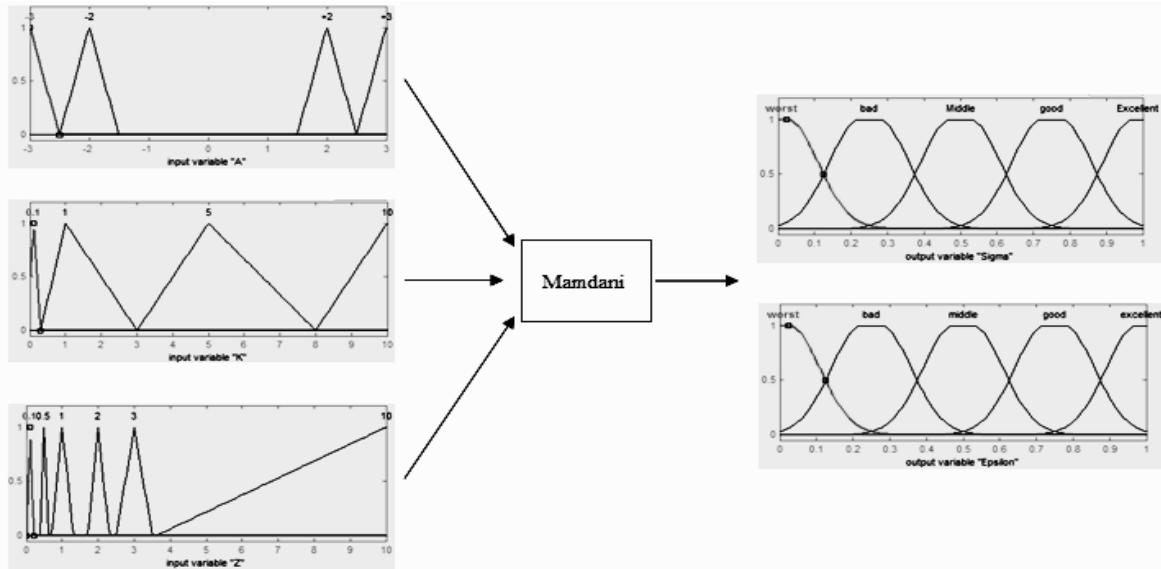


Рис. 5. – Структура нечеткого оценивания и ранжирования с алгоритмом Mamdani

Правила нечеткого алгоритма представлены в таблице.2. Представленные правила содержат в себе набор условий, которые охватывают всевозможные варианты всех возможных событий.

Таблица 2. – Логические правила вывода для нечеткого алгоритма

1. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is excellent)	29. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 3) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
2. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 0.5) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	30. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 10) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
3. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 1) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	31. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
4. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 2) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	32. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 0.5) then (Sigma is Middle)(Epsilon is excellent) (1)
5. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 3) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	33. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 1) then (Sigma is Middle)(Epsilon is excellent) (1)
6. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 10) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	34. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 2) then (Sigma is bad)(Epsilon is good) (1)
7. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 0.1) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)	35. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 3) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)
8. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 0.5) then (Sigma is bad)(Epsilon is excellent) (1)	36. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 10) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)
9. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 1) then (Sigma is bad)(Epsilon is excellent) (1)	37. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
10. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 2) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)	38. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 0.5) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
11. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 3) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)	39. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 2) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
12. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 10) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)	40. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 3) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
13. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	41. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 10) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
14. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 0.5) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	42. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 0.1) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)
15. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 1) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	43. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 0.5) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)
16. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 2) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	44. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 2) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)
17. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 3) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	45. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 3) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)
18. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 10) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)	46. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 10) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)
19. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 0.1) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)	47. If (A is +3) and (K is 5) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
20. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 0.5) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)	48. If (A is +3) and (K is 5) and (Z is 0.5) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
21. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 1) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)	49. If (A is +3) and (K is 5) and (Z is 1) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
22. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 2) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)	50. If (A is +3) and (K is 5) and (Z is 2) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
23. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 3) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)	51. If (A is +3) and (K is 5) and (Z is 3) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
24. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 10) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)	52. If (A is +3) and (K is 5) and (Z is 10) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
25. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)	53. If (A is +2) and (K is 5) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
26. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 0.5) then (Sigma is bad)(Epsilon is excellent) (1)	54. If (A is +2) and (K is 5) and (Z is 0.5) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
27. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 1) then (Sigma is bad)(Epsilon is excellent) (1)	55. If (A is +2) and (K is 5) and (Z is 1) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
28. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 2) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)	

Реализованные, на основе правил в таблице 2, алгоритмы учитывают вес каждой входной величины, иными словами каждого входного фактора, тем самым они передают опыт специалиста для выбора наилучшего варианта. В этом заключается преимущества использования интеллектуальных алгоритмов перед традиционными алгоритмами настройки параметрических регуляторов.

На рисунке 6 и в таблице 3 представлены результаты оценки настраиваемых параметров регулятора при различных по величине и типу возмущениях реактивности ЯР. Каждый рассмотренный случай имеет свою индивидуальную оценку, что позволяет

найти оптимальную настройку параметрического регулятора мощности для каждого из типов возмущения.

Таблица 3. – Логические правила вывода для нечеткого алгоритма

		A^{3+}		A^{3-}		
K	z	σ	ϵ	σ	ϵ	средние значения оценок
1	0.5	0.251	0.754	0.5	0.754	0.5647
1	0.8	0.251	0.754	0.754	0.87	0.6572
1	1	0.251	0.9254	0.754	0.87	0.70005
1	1.1	0.251	0.754	0.5	0.87	0.5937
1	1.2	0.251	0.754	0.754	0.87	0.6572
1	1.4	0.251	0.87	0.754	0.87	0.6862
1	1.5	0.251	0.9254	0.9254	0.87	0.7429
1	1.6	0.251	0.2508	0.754	0.9254	0.54525
1	1.8	0.251	0.2508	0.754	0.87	0.5314
1	2	0.251	0.2508	0.5	0.87	0.4679

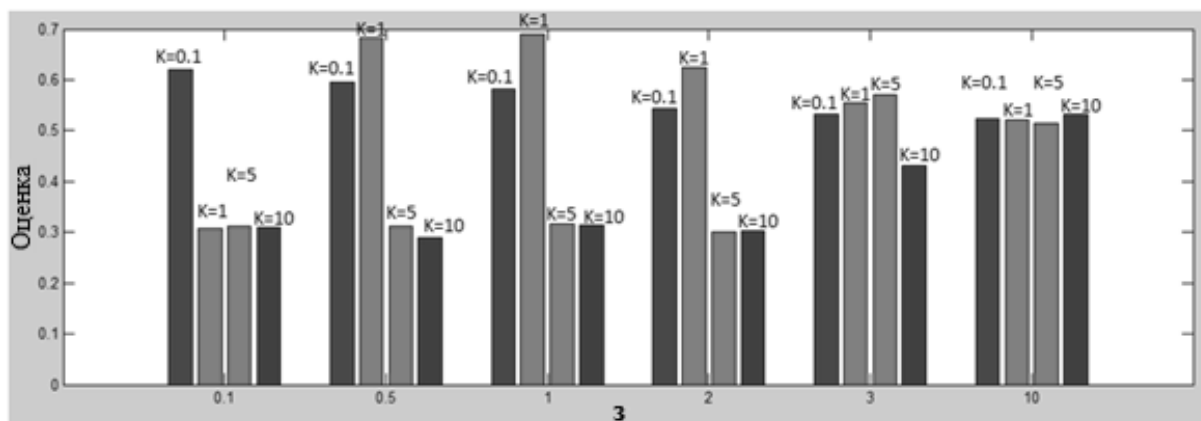


Рис. 6. – Оценка показателей качества АРМ на основе нечеткого подхода

ВЫВОДЫ

В процессе исследования были выявлены основные преимущества использования алгоритмов нечеткой логики с целью оценки качества регулирования и оптимизации настроек автоматического регулятора мощности (АРМ) ядерного реактора. В результате были получены оптимальные настройки АРМ для различных режимов работы ЯЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилова, Т.А. и др. Базы знаний интеллектуальных систем [Текст] / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: «Питер», 2000. – 384 с.
2. Выговский, С.Б. и др. Учебная лаборатория на базе многофункционального анализатора реакторной установки АЭС с ВВЭР [Текст] / С.Б. Выговский, С.А. Королев, Е.В. Чернов // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2012. – Т.1. – №1. – С. 104–110.

3. Жучков А.А. Игровые и интеллектуальные подходы к выбору настроек регулятора мощности в АСУТП АЭС [Текст] / А.А. Жучков // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ – 2010. – Т.1. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 137–140.
4. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [Электронный ресурс] // Консультационный центр Matlab компании SoftLine. Раздел «Проектирование систем управления Fuzzy Logic Toolbox». – Режим доступа: URL: <http://www.matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/bookl/index.php> – 01.11.2016.

REFERENCES

- [1] Gavrilova T.A., Khoroshevskii V.F. Bazy znaniy intellektualnykh system [Knowledge bases of intellectual systems]. Sankt-Peterburg. Pub. «Piter» [Piter], 2000. 384 p. (in Russian)
- [2] Vygovskii S.B., Korolev S.A., Chernov E.V. Uchebnaia laboratoriia na baze mnogofunktsionalnogo analizatora reaktornoj ustanovki AES s VVER [Educational laboratory on the basis of the multipurpose analyzer of reactor installation of the NPP with PWR]. Vestnik Natsionalnogo issledovatel'skogo iadernogo universiteta «MIFI» [Bulletin of National research nuclear university "MEPhI"]. 2012, Vol. 1, №1, ISSN 2304-487X, pp. 104–110. (in Russian)
- [3] Zhuchkov A.A. Igrovye i intellektualnye podkhody k vyboru nastroek regulatora moshchnosti v ASUTP AES [Game and intellectual approaches to the choice of settings of the power regulator in the NPP PCS]. Trudy nauchnoi sessii NIIaU MIFI [Works of a scientific session of National research nuclear university MEPhI], 2010. Vol. 1. M. Pub. NIIaU MIFI [NRNU MEPhI], 2010, pp. 137–140. (in Russian)
- [4] Vvedenie v teoriu nechetkikh mnozhestv i nechetkuiu logiku. [Introduction to the theory of indistinct sets and fuzzy logic.] Konsultatsionnyi tsentr Matlab kompanii SoftLine. Razdel «Proektirovanie sistem upravleniia Fuzzy Logic Toolbox» [Matlab advice center of the SoftLine company. Section "Design of Control Systems of Fuzzy Logic Toolbox"]. Available at: <http://www.matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/bookl/index.php> (in Russian)

Quality Assessment of Regulation and Optimization of the Power Automatic Regulator Settings of PWR-1000 Reactor

H.F. Almasri

*National Research Nuclear University «MEPhI»,
Kashirskoye Shosse, 31, Moscow, Russia 115409
e-mail: husam_almasri@hotmail.com*

Abstract – The problem of power regulation quality of the reactor is one of urgent in nuclear power. Researches of control systems for improvement of quality of the reactor power regulation are constantly conducted. In this way the research of models of intelligent power regulators in the PCS of nuclear reactors on the multipurpose computer PWR-1000 analyzer is represented important. In this work the block diagram for quality assessment of regulation and optimization of settings of the automatic power regulator of the PWR-1000 reactor constructed on the basis of intellectual control algorithms of fuzzy logic type is submitted. The purpose of this work is to find optimum settings of the regulator and to estimate quality of regulation at various natures of indignations where the minimum errors of regulation of sigma and epsilon. In work it is shown that perspective options for optimization of settings of the automatic power regulator are intellectual control algorithms on the basis of fuzzy logic.

Keywords: artificial intelligence, fuzzy logic, optimization, nuclear reactor, automatic power regulator.