

УДК 66.067.55

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ФАЗИРОВАННЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ КВ-ДИАПАЗОНА

А.А. Шилов, О.А. Белоусов

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
ГОУ ВПО «ТГТУ»*

Ключевые слова и фразы: нейронная сеть; нечеткая логика; система управления; фазированная антенная решетка.

Аннотация: Рассмотрена интеллектуальная система управления фазированными антенными решетками коротковолнового диапазона использующая алгоритмы нечеткой логики, нейросетевые алгоритмы и имеющая в составе экспертную систему. Данная система позволяет в реальном масштабе времени управлять фазированными антенными решетками и решать широкий круг задач по обеспечению устойчивой связи в коротковолновом диапазоне.

Современный этап развития коротковолновой связи характеризуется совершенствованием ее технических средств, целью которого должно быть достижение максимальной степени автоматизации и адаптации к изменяющимся характеристикам каналов передачи информации. Автоматическое управление радиосвязью потребовало разработки автоматизированных радиоприемных и радиопередающих центров, которые позволяют повысить надежность связи и сократить время подготовки аппаратуры к работе, сделать систему более экономичной, особенно при длительном отсутствии нагрузки и работе в ждущем режиме. Основное требование, предъявляемое в настоящее время к системам коротковолновой (КВ) радиосвязи, важность которого будет увеличиваться в будущем при их разработке и совершенствовании – это работа в адаптивном режиме в условиях полной неопределенности. При этом все процессы, обеспечивающие адаптацию приемопередающего комплекса к постоянно меняющимся внешним воздействиям должны быть полностью автоматизированными [1]. По этим и другим причинам разработка и активное применение интеллектуальной системы управления фазированными антенными решетками (ИСУ ФАР) является актуальной задачей на современном этапе развития КВ связи.

Под адаптацией понимают способность системы оптимизировать себя или свое окружение при неблагоприятных для нее изменениях для частичного или полного восполнения качества своего функционирования. Автоматизированная адаптивная система должна обладать возможностью экстраполировать свое оптимальное качество, то есть обладать способностью прогнозировать изменение своего состояния. Автоматизированные системы радиосвязи относят к большим системам. Функционирование любой большой системы всегда связано с процессами управления и адаптации.

На рис. 1 представлена структурная схема ИСУ ФАР, в которой используются алгоритмы нечеткой логики и нейросетевые алгоритмы.

Ее составными частями являются: подсистема выбора цели, с помощью которой происходит определение задач, стоящих перед ИСУ; подсистема контроля, основывающаяся на датчиках состояния системы ($DZ_1, DZ_2 \dots DZ_n$ – виртуальные датчики волнового сопротивления ячеек ФАР; $D\Phi_1, D\Phi_2 \dots D\Phi_n$ – виртуальные датчики фазы сигнала в ячейках ФАР; $DC_1, DC_2 \dots DC_n$ – виртуальные

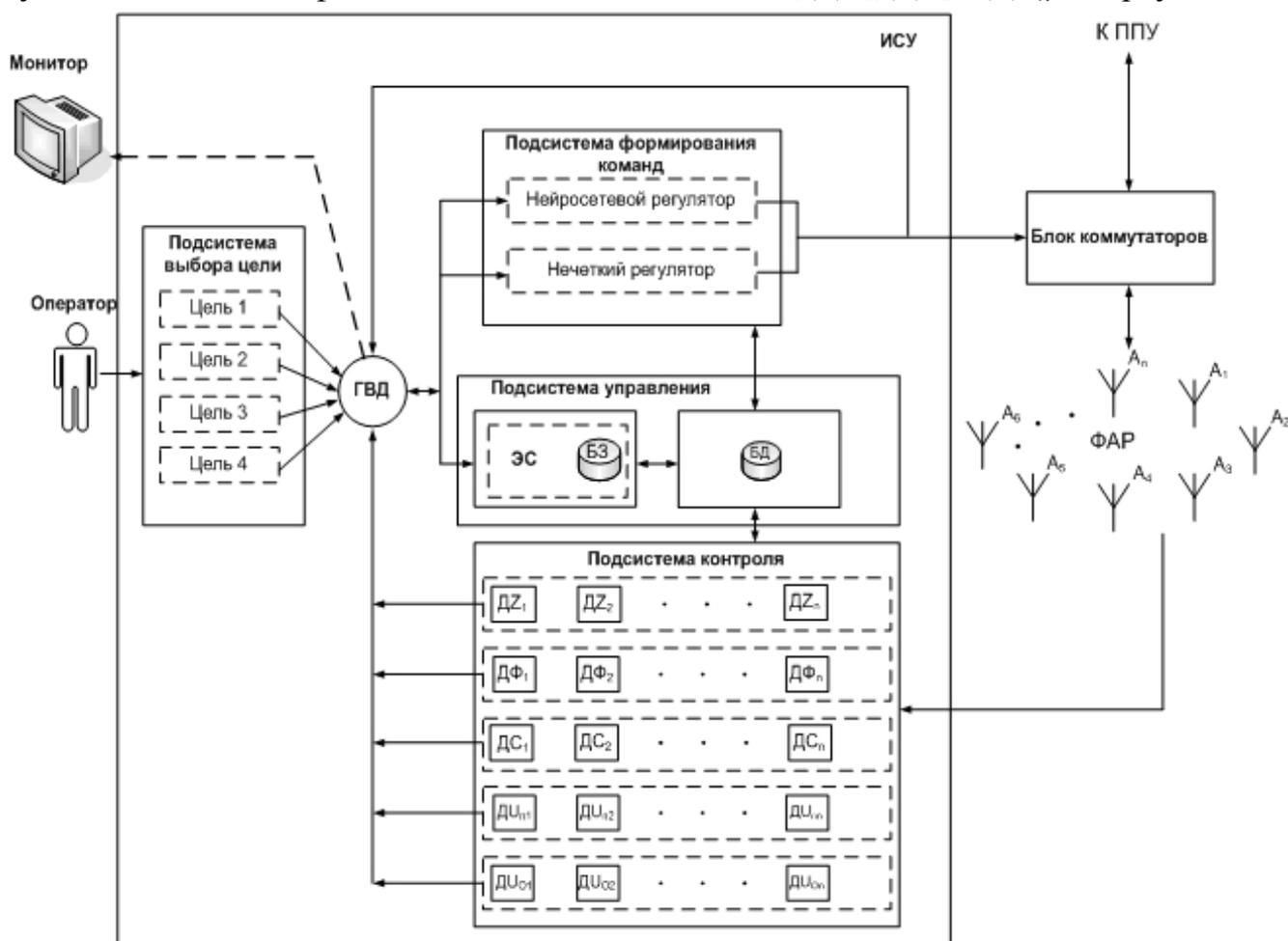


Рис. 1. Структурная схема ИСУ ФАР КВ диапазона

датчики уровня сигнала в ячейках ФАР; $DU_{П1}$, $DZ_{П2} \dots DZ_{Пn}$ – виртуальные датчики падающей волны; DU_{O1} , $DZ_{O2} \dots DZ_{On}$ – виртуальные датчики отраженной волны); подсистема управления, которая является экспертной системой, принимающей решения об адаптивном управлении; подсистема формирования команд, построенная на различных видах регуляторов (нейросетевой, нечеткий), в задачи которой входит расчет параметров адаптивного управления.

Датчики состояния вырабатывают информацию о прохождении радиоволн, помеховой обстановке, состоянии радиосредств, показателях качества каналов связи. Эта информация поступает и обрабатывается главным виртуальным датчиком (ГВД), который, в зависимости от важности характеристик и поставленных целей, формирует, глобальный показатель качества, необходимый для определения наилучших вариантов работы системы и выбора оптимальных параметров.

Задачей подсистемы управления является формирование и поиск оптимальных алгоритмов работы ИСУ на основе продукционных правил, которые содержатся в базе знаний (БЗ). База данных (БД) экспертной системы содержит информацию о динамических характеристиках модели системы связи, а также об идентифицированных параметрах. Эта информация необходима для полноценной работы беспойсковой адаптивной системы с настраиваемой моделью.

В подсистеме формирования команд происходит расчет фазы сигнала и волнового сопротивления для каждой из ячеек ФАР.

При расчете фазы сигнала используется нейросетевой регулятор. Использование нейросетевых алгоритмов, а также последующее применение нейрокомпьютеров при решении задач фазирования антенн с электрическим сканированием луча позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на расчет фазы сигнала в n -ой ячейке ФАР. Системы, созданные на основе нейронных сетей (НС) обладают следующими достоинствами:

- высокое быстродействие, связанное с тем, что алгоритмы нейроинформатики обладают высокой степенью параллельности;
- устойчивость к помехам и разрушениям;
- возможность создания из ненадежных элементов, имеющих значительный разброс параметров.

Недостатками нейросистем является то, что они создаются для решения конкретных задач.

Построение нейронной сети происходит в три этапа: выбор типа сети (архитектуры), подбор весовых коэффициентов сети (обучение) и проверка сети.

На первом этапе разработчик НС сталкивается со следующей проблемой: с одной стороны существует большое количество типов нейронных сетей (сети

Хопфилда, Хэмминга, Кохонена, перцептроны и т.д.), а с другой стороны отсутствует строгая теория по выбору конкретного типа, поэтому основой этого этапа является оценка необходимого числа синаптических весов и нейронов в скрытых слоях, которые соответственно рассчитываются по формулам (2) и (3).

Расчет оценки выглядит следующим образом

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \left(\frac{N}{m} + 1 \right) (n + m + 1) + m, \quad (1)$$

где n – размерность входного сигнала; m – размерность выходного сигнала; N – число элементов обучающей выборки.

$$L = \frac{L_w}{n + m}. \quad (2)$$

Следующим этапом разработки НС является ее обучение. Процесс обучения может рассматриваться как настройка архитектуры сети и весов связей для эффективного выполнения специальной задачи. Обычно нейронная сеть должна настроить веса связей по имеющейся обучающей выборке. Функционирование сети улучшается по мере итеративной настройки весовых коэффициентов. Процесс обучения НС показан на рис. 2.

На завершающем этапе созданную НС проверяют на примерах, не вошедших в обучающую выборку, после чего делается заключение о пригодности применения данной НС [2, 3].

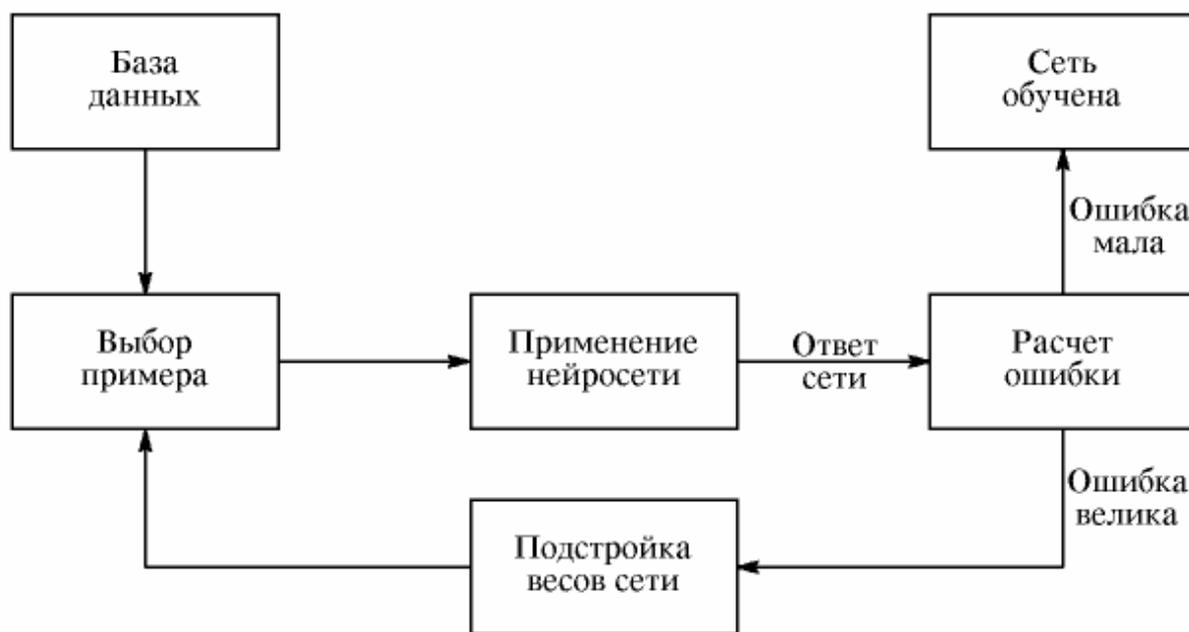


Рис. 2. Иллюстрация процесса обучения НС

В качестве примера ниже рассмотрен процесс создания сети для расчета фазы сигнала для ячеек кольцевой ФАР (КФАР), состоящей из двенадцати излучателей.

Из формулы (3) следует, что фаза сигнала на отдельной ячейке КФАР зависит от длины волны, на которой ведется прием или передача сигнала, угла места главного лепестка ДН в пространстве и азимутального угла главного лепестка

$$\psi_n = 2\pi \frac{R}{\lambda} \cos \Delta_0 \cos \left(\varphi_0 - \frac{2\pi(n-1)}{N} \right), \quad (3)$$

где R – радиус КФАР, м; λ – длина волны, на которой ведется прием или передача сигнала, м; Δ_0 – угол места главного лепестка ДН в пространстве; φ_0 – азимутальный угол главного лепестка ДН; n – номер ячейки КФАР; N – общее число ячеек КФАР.

Таким образом, НС будет иметь три входа и двенадцать выходов (число ячеек КФАР).

Для формул (2) и (3) имеем следующие параметры: $n = 36$, $m = 12$, $N = 100$, по которым произведем примерную оценку необходимого числа синаптических весов и нейронов в скрытых слоях

$$\frac{1200}{7} \leq L_w \leq 12 \cdot 9,3 \cdot 49 + 12;$$

$$171 \leq L_w \leq 5480;$$

$$L = \frac{2825}{48} \approx 60.$$

Структурная схема сети представлена на рис. 3.

Данная сеть прямого распространения имеет три слоя: входной, скрытый и выходной, которые состоят соответственно из 36, 60 и 12 нейронов.

График зависимости функции ошибки от числа эпох (однократное представление всех обучающих входных данных на входы сети), полученный в среде MATLAB показан на рис. 4.

Таким образом среднее квадратичное отклонение фазы (для обучающей выборки), рассчитанной НС, от фазы, найденной по формуле (1), составляет величину порядка 10^{-5} радиан. Увеличение элементов обучающей выборки, а также повышение точности работы НС с вышеописанной структурой возможно при:

- увеличении времени обучения НС;
- увеличении числа скрытых слоев;
- увеличении числа нейронов в имеющихся скрытых слоях.

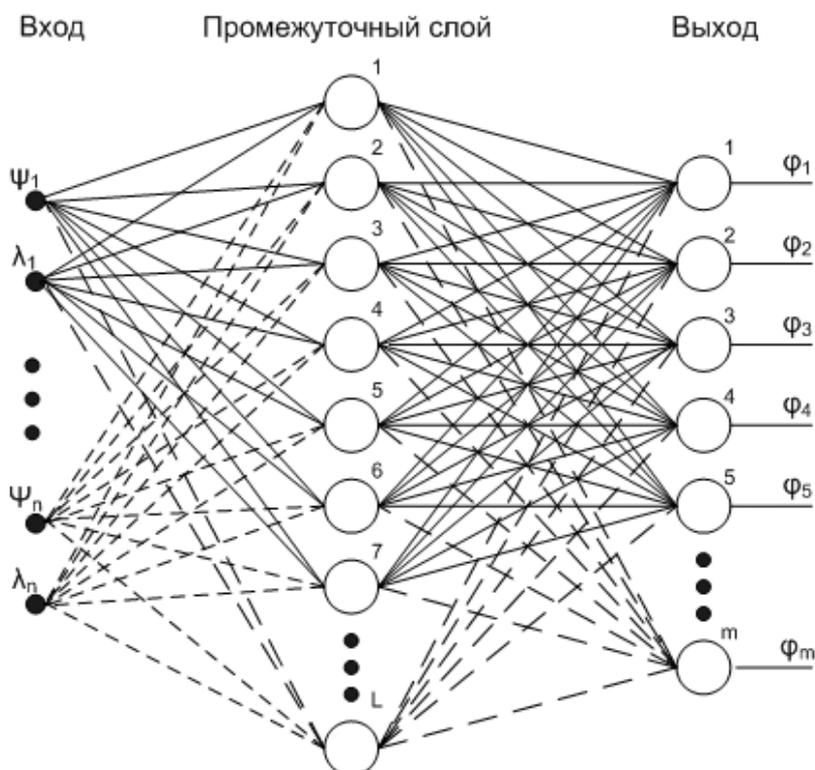


Рис. 3. Структурная схема архитектуры сети

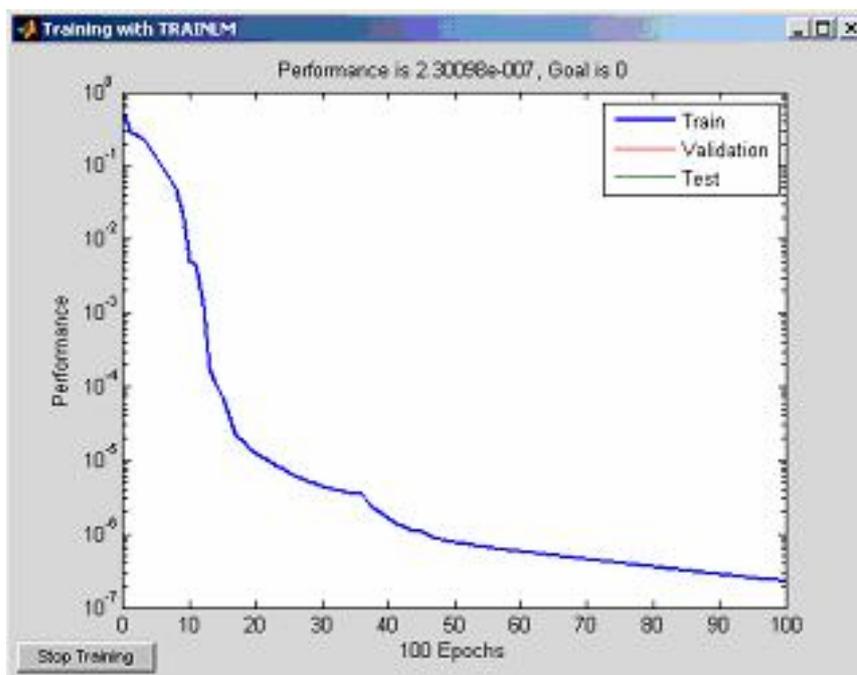


Рис. 4. Состояние обучения НС

Поскольку предполагается, что ФАР работает в широком диапазоне частот (от 1,5 до 30 МГц), то необходимо отметить, что процесс согласования линий передачи с антенными устройствами является ключевым при создании антенно-фидерных устройств и напрямую влияет на их эффективность и качество работы.

На рис. 5 представлен график зависимости комплексного сопротивления ФАР от частоты, полученный в программе MMANA.

Для согласования волнового сопротивления антенно-фидерного тракта на различных рабочих частотах, используется алгоритм нечеткой логики.

В диапазоне частот от 1,5 до 30 МГц (рабочий частотный диапазон ФАР) на графике можно выделить несколько интервалов, на которых активная составляющая антенны сопротивления антенны (кривая 1) изменяются на достаточно большую величину:

- от 1,5 до 12 МГц;
- от 12 до 18 МГц;
- от 18 до 21 МГц;
- от 21 до 25 МГц;
- от 25 до 30 МГц.

Для создаваемой системы нечеткого вывода частота будет являться входной лингвистической переменной $\bar{F} = (\bar{f}_{ом}, \bar{f}_м, \bar{f}_{ср}, \bar{f}_б, \bar{f}_{об})$ с термами: «очень малая частота диапазона», «средняя частота диапазона», «большая частота диапазона», «очень большая частота диапазона». Функции принадлежности нечетких множеств $\bar{f}_{ом}, \bar{f}_м, \bar{f}_{ср}, \bar{f}_б, \bar{f}_{об}$ приведены на рис. 6, а их аналитические выражения имеют вид:

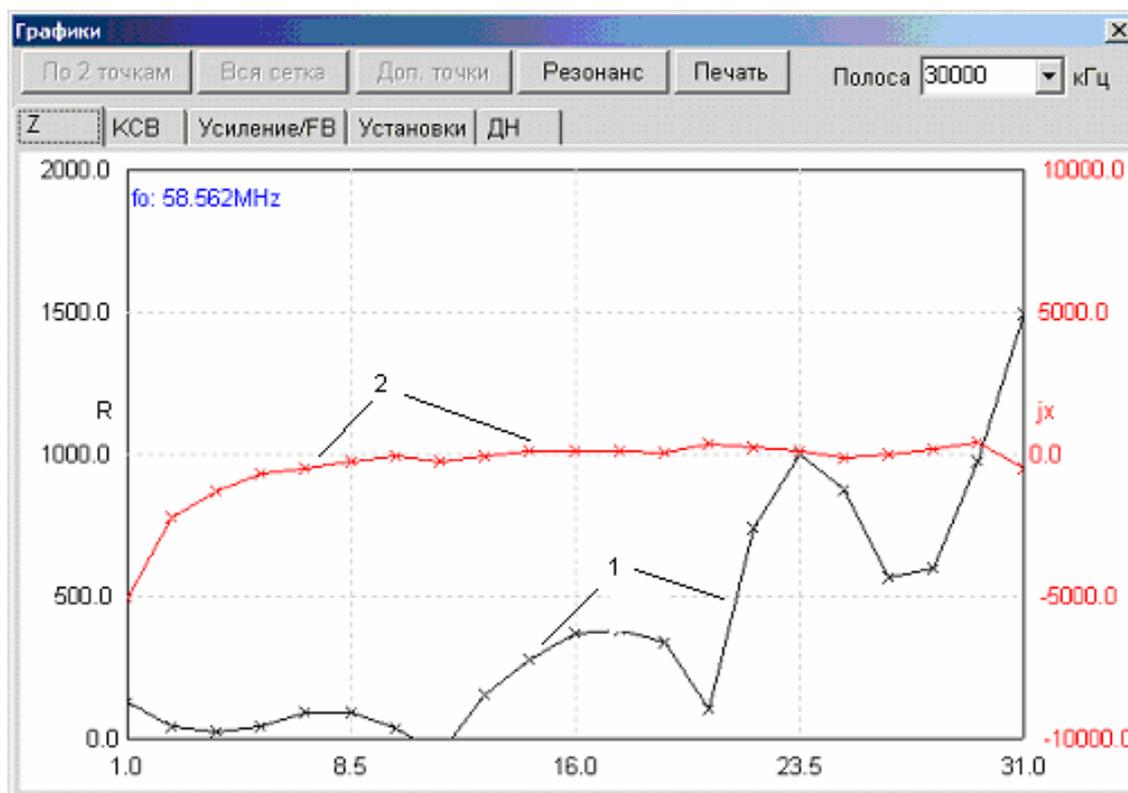


Рис. 5. График зависимости комплексного сопротивления ФАР от частоты

$$\mu_{\text{ом}}(F) = \begin{cases} 0, F \leq 1,5; \\ \frac{F - 1,5}{4 - 1,5}, F \in (1,5; 4); \\ 1, F = 4; \\ \frac{13 - F}{13 - 4}, F \in (4; 13); \\ 0, F \geq 13, \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{\text{м}}(F) = \begin{cases} 0, F \leq 9; \\ \frac{F - 9}{14 - 9}, F \in (9; 14); \\ 1, F = 14; \\ \frac{19 - F}{19 - 14}, F \in (14; 19); \\ 0, F \geq 19, \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{\text{сп}}(F) = \begin{cases} 0, F \leq 16; \\ \frac{F - 16}{19 - 16}, F \in (16; 19); \\ 1, F = 19; \\ \frac{23 - F}{23 - 18}, F \in (18; 23); \\ 0, F \geq 23, \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{\text{б}}(F) = \begin{cases} 0, F \leq 19 \\ \frac{F - 19}{23 - 19}, F \in (19; 23); \\ 1, F = 23; \\ \frac{27 - F}{27 - 23}, F \in (27; 25); \\ 0, F \geq 27, \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{\text{об}}(F) = \begin{cases} 0, F \leq 23; \\ \frac{F - 23}{27 - 23}, F \in (23; 27); \\ 1, F = 27; \\ \frac{30 - F}{30 - 27}, F \in (27; 30); \\ 0, F \geq 30. \end{cases} \quad (8)$$

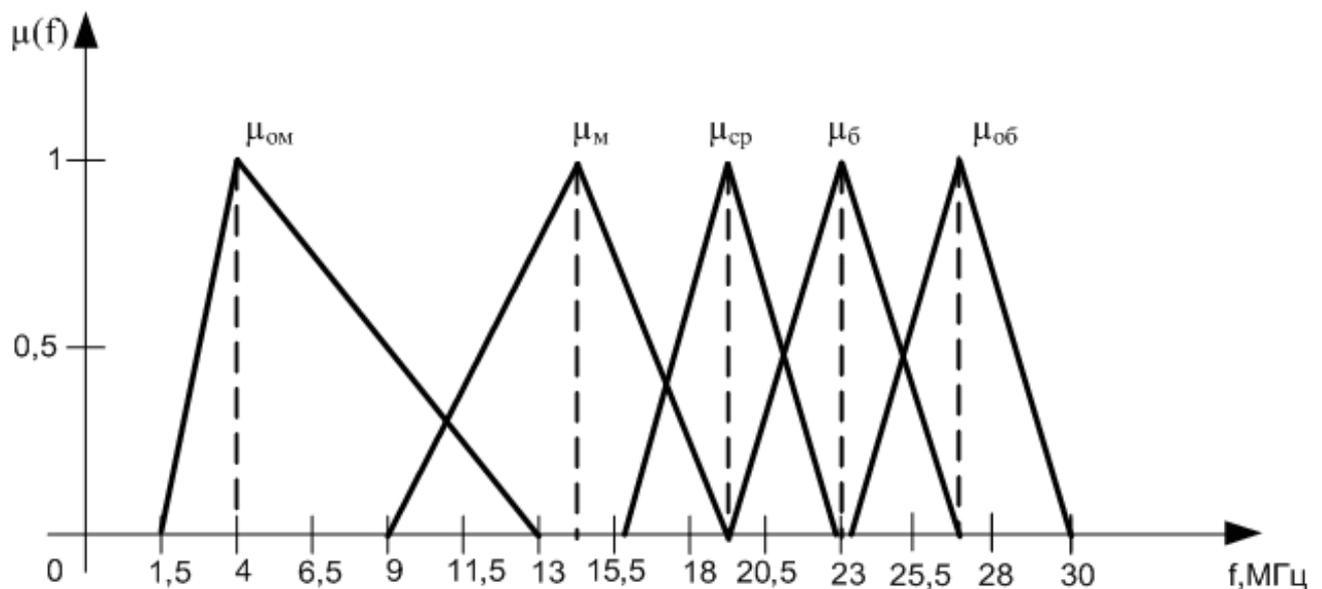


Рис. 6. Функция принадлежности для термов входной лингвистической переменной «Частота»

Выходными лингвистическими переменными являются активная $\bar{R} = (\bar{r}_{ом}, \bar{r}_м, \bar{r}_{ср}, \bar{r}_б, \bar{r}_{об})$ и реактивная $\bar{X} = (\bar{x}_{отр}, \bar{x}_0, \bar{x}_{пол})$ составляющие комплексного сопротивления линии передачи, которые соответственно имеют термы: «очень малое сопротивление», «малое сопротивление», «среднее сопротивление», «большое сопротивление», «очень большое сопротивление», «емкостный характер», «ноль» и «индуктивный характер».

Функции принадлежности нечетких множеств $\bar{r}_{ом}, \bar{r}_м, \bar{r}_{ср}, \bar{r}_б, \bar{r}_{об}$ приведены на рис. 7, а их аналитические выражения имеют вид:

$$\mu_{ом}(R) = \begin{cases} 0, R \leq 10; \\ \frac{R-10}{100-10}, R \in (10; 100); \\ 1, R = 100; \\ \frac{200-R}{200-100}, R \in (100; 200); \\ 0, R \geq 200, \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_M(R) = \begin{cases} 0, R \leq 150; \\ \frac{R - 150}{250 - 150}, R \in (150; 250); \\ 1, R = 250; \\ \frac{400 - R}{400 - 250}, R \in (250; 400); \\ 0, R \geq 400, \end{cases} \quad (10)$$

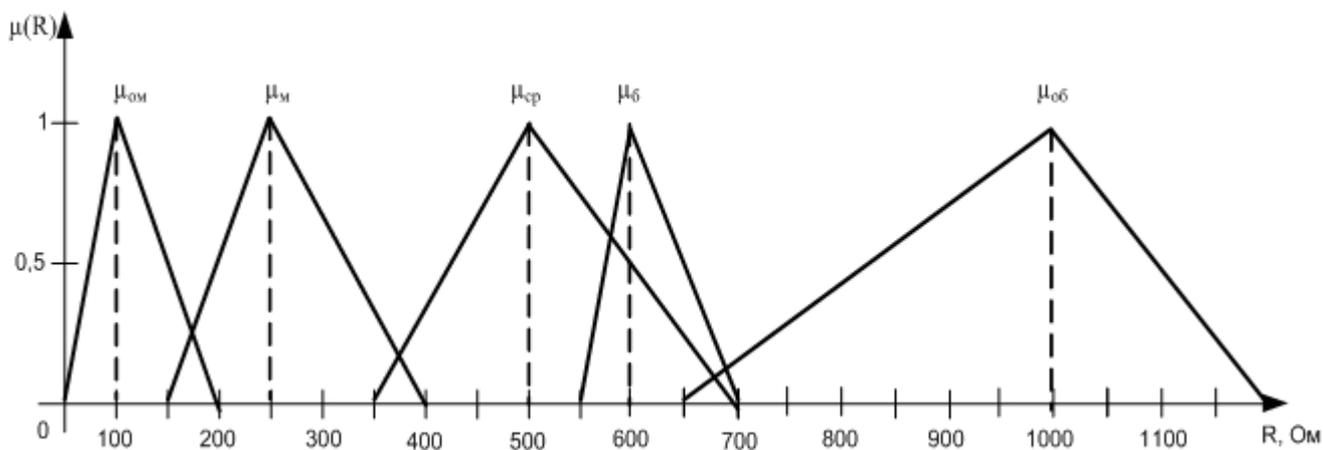


Рис. 7. Функция принадлежности для термов входной лингвистической переменной «Активная составляющая сопротивления»

$$\mu_{сп}(R) = \begin{cases} 0, R \leq 350; \\ \frac{R - 350}{500 - 350}, R \in (350; 500); \\ 1, R = 500; \\ \frac{700 - R}{700 - 500}, R \in (500; 700); \\ 0, R \geq 700, \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_б(R) = \begin{cases} 0, R \leq 550; \\ \frac{R - 550}{600 - 550}, R \in (550; 600); \\ 1, R = 600; \\ \frac{700 - R}{700 - 600}, R \in (600; 700); \\ 0, R \geq 700, \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{\bar{0}}(R) = \begin{cases} 0, R \leq 650; \\ \frac{R - 650}{1000 - 650}, R \in (650; 1000); \\ 1, R = 1000; \\ \frac{1200 - R}{1200 - 1000}, R \in (1000; 1200); \\ 0, R \geq 1200. \end{cases} \quad (13)$$

Функции принадлежности нечетких множеств $\bar{x}_{\text{отр}}, \bar{x}_0, \bar{x}_{\text{пол}}$ приведены на рис. 8, а их аналитические выражения имеют вид:

$$\mu_{\text{пол}}(X) = \begin{cases} 0, X \leq 0; \\ \frac{X - 125}{125 - 0}, X \in (0; 125); \\ 1, X = 125; \\ \frac{250 - X}{250 - 125}, X \in (125; 250); \\ 0, X \geq 250, \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_0(X) = \begin{cases} 0, X \leq -250; \\ \frac{X - 0}{-250 - 0}, X \in (-250; 0); \\ 1, X = 0; \\ \frac{125 - X}{125 - 0}, X \in (0; 125); \\ 0, X \geq 125, \end{cases} \quad (15)$$

$$\mu_{\text{отр}}(X) = \begin{cases} 0, X \leq -1250; \\ \frac{X + 1000}{-1000 + 1250}, X \in (-1250; -1000); \\ 1, X \in (-1000; -750); \\ \frac{-125 - X}{-125 + 750}, X \in (-750; -125); \\ 0, X \geq -125. \end{cases} \quad (16)$$

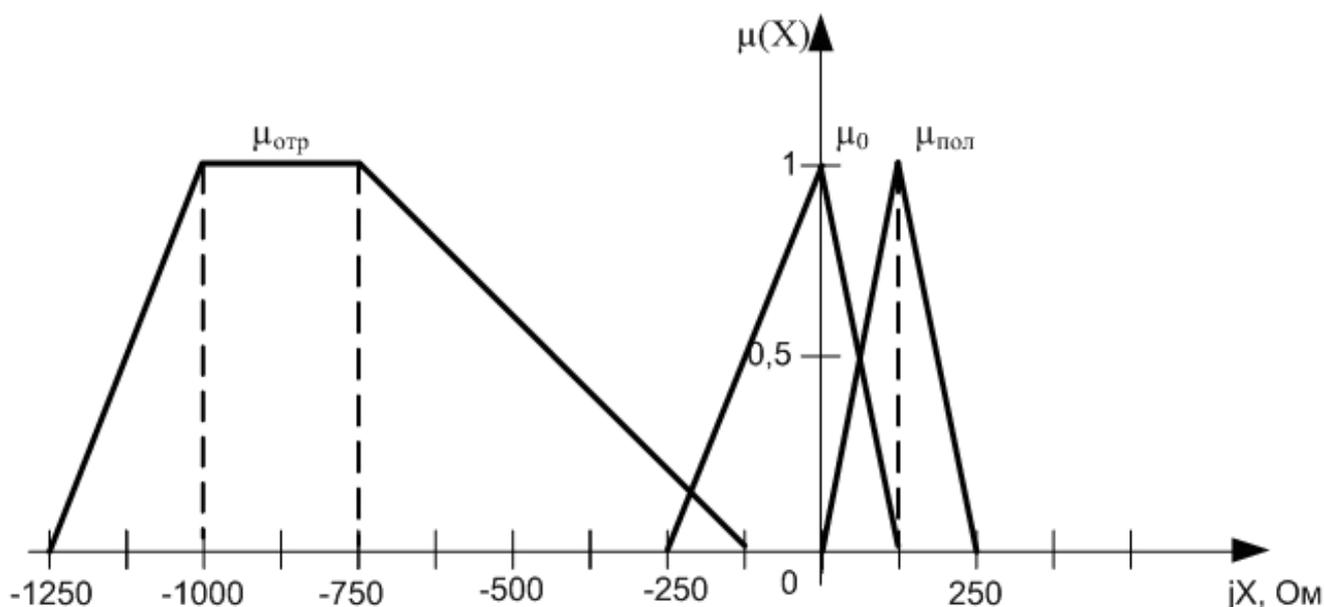


Рис. 8. Функция принадлежности для термов входной лингвистической переменной «Реактивная составляющая сопротивления»

Алгоритм нечеткого регулятора в терминах вход–выход, то есть для входов «частота» и выхода «Активная составляющая сопротивления» и «Реактивная составляющая сопротивления» задается система продукционных правил:

П1: «Если \bar{F} есть $\bar{f}_{\text{ом}}$, то \bar{R} есть $\bar{r}_{\text{ом}}$ и \bar{X} есть $\bar{x}_{\text{отр}}$ »;

П2: «Если \bar{F} есть $\bar{f}_{\text{м}}$, то \bar{R} есть $\bar{r}_{\text{м}}$ и \bar{X} есть \bar{x}_0 »;

П3: «Если \bar{F} есть $\bar{f}_{\text{ср}}$, то \bar{R} есть $\bar{r}_{\text{ср}}$ и \bar{X} есть \bar{x}_0 »;

П4: «Если \bar{F} есть $\bar{f}_{\text{б}}$, то \bar{R} есть $\bar{r}_{\text{б}}$ и \bar{X} есть \bar{x}_0 »;

П5: «Если \bar{F} есть $\bar{f}_{\text{об}}$, то \bar{R} есть $\bar{r}_{\text{б}}$ и \bar{X} есть $\bar{x}_{\text{пол}}$ ».

Техническая реализация ИСУ ФАР представлена на рис. 9.

В состав данной системы входит $УУ_1 \dots УУ_n$ – управляющие устройства, содержащие датчики фазы – ДФ, датчики сигнала – ДС, датчики волнового сопротивления – ДЗ, а также высокочастотный канал – ВЧК и модули дискретного и аналогового ввода/вывода М-7053 и М-7019, которые имеют выход для переда-

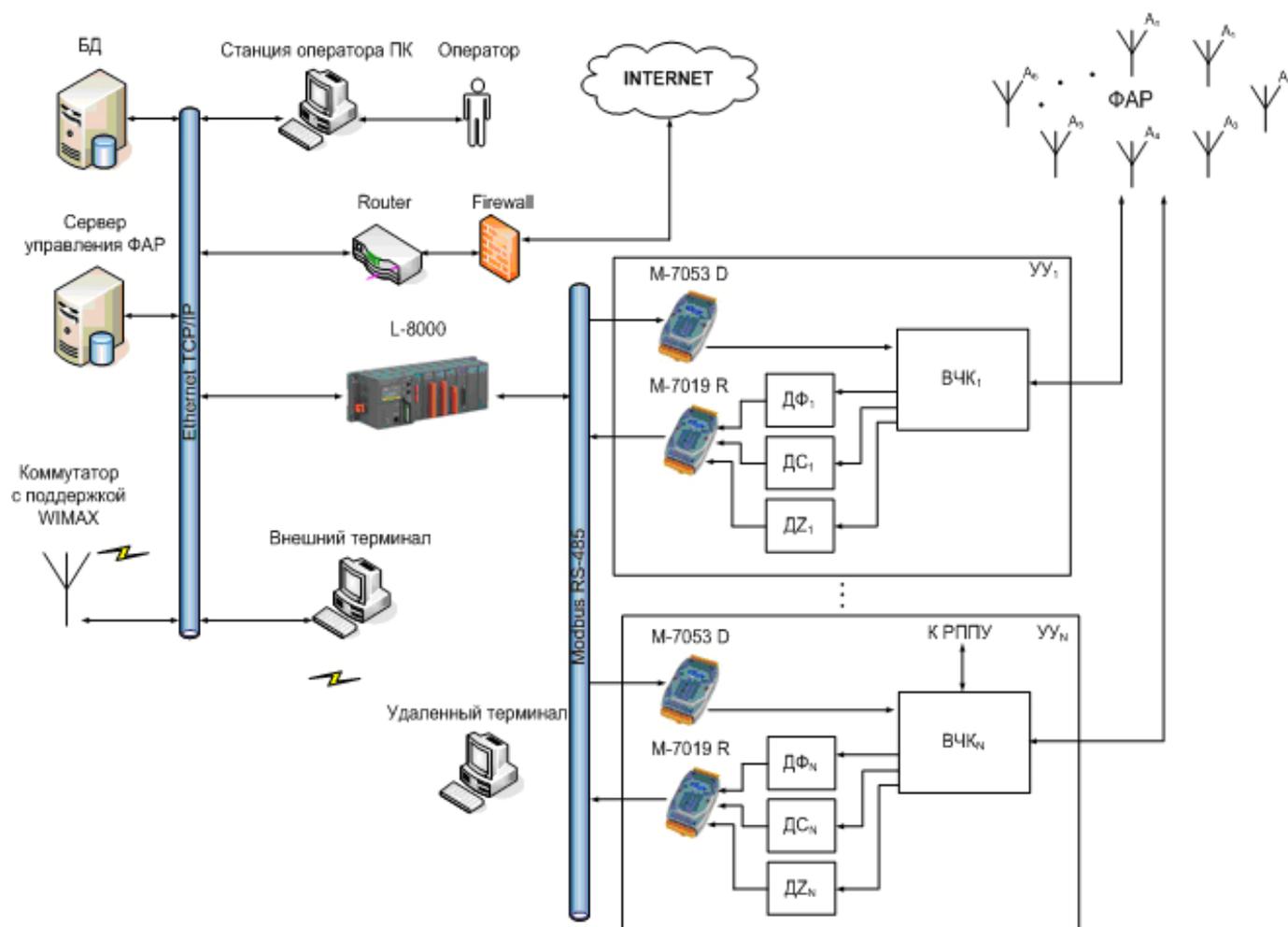


Рис. 9. Техническая реализация системы ИСУ ФАР

чи информации по интерфейсам RS-485 или ModBus. Информация с УУ поступает на контроллер L-8000 с последующим подключением к сети Ethernet. Данный контроллер обрабатывает информацию и формирует сигналы для управления УУ. Контроллер имеет связь с базой данных и сервером управления ФАР в котором содержится экспертная система и база знаний. В рассмотренной системе управления также присутствует станция оператора, которая производит управление и мониторинг ФАР согласно поставленным задачам. В ней реализован беспроводный интерфейс позволяющий производить мониторинг и корректировку работы с внешних и удаленных беспроводных или мобильных терминалов, что немаловажно при удалении от передающего центра.

Рассмотренная ИСУ позволяет в реальном масштабе времени управлять ФАР и решать широкий круг задач по обеспечению устойчивой связи в КВ диапазоне. Достоинством данной системы является то, что в ней сочетаются такие элементы искусственного интеллекта, как:

- нейросетевые алгоритмы с возможностью обучения;

– алгоритмы нечеткой логики, которые эффективны в задачах управления объектами;

– продукционная экспертная система.

Вышеописанные свойства ИСУ позволяют ей легко адаптироваться для систем связи различных диапазонов с возможностью удаленного управления через Internet, что позволяет полностью автоматизировать узел связи и сделать его малообслуживаемым.

Список литературы

1. Головин, О.В. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / О.В. Головин, С.П. Простов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 598 с.

2. Дьяконов, В. Математические пакеты расширения MatLab. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб. : Питер, 2001. – 480 с.

3. Комашинский, В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2003. – 94 с.

4. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

THE INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM OF PHASED ANTENNA LATTICES OF HF RANGE

A.A. Shilov, O.A. Belousov

Key words and phrases: control system; fuzzy logic; neural network; the intellectual control system of phased antenna lattices.

Abstract: The intellectual control system of the phased antenna lattices of a short-wave range using algorithms of fuzzy logic, neural networks and contains in structure expert system is considered. This system allows to operate phased antenna lattices in real time scale and to solve most problems on maintenance of steady communication in short-wave range.