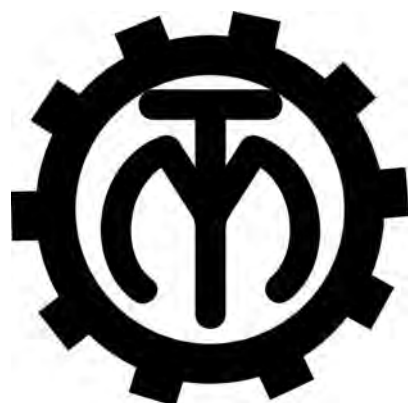


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технология машиностроения»

НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА И ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов направления подготовки
15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
очной формы обучения*



Могилев 2019

УДК 621.01
ББК 65.304.15
Н 79

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технология машиностроения»
«30» октября 2018 г., протокол № 5

Составители: д-р техн. наук, проф. В. М. Пашкевич;
канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

Рецензент канд. техн. наук, доц. А.П. Прудников

В методических рекомендациях даны задания к практическим занятиям для студентов направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» очной формы обучения по дисциплине «Нечеткая логика и искусственные нейронные сети», приведены указания по их выполнению.

Учебно-методическое издание

НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА И ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ

Ответственный за выпуск	В. М. Шеменков
Технический редактор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 46 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.

Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2019



Содержание

1	Метод Байеса.....	4
2	Построение решающих правил.....	5
3	Построение нечетких множеств.....	7
4	Нечеткий вывод.....	8
5	Метрическое распознавание образов.....	9
6	Обучение распознаванию образов.....	11
7	Построение нейронных сетей.....	12
8	Методы обучения сетей.....	14
	Список литературы.....	16

1 Метод Байеса

Задание

По результатам наблюдений за передачами определить вероятности их принадлежности классам состояний.

В качестве симптомов выбраны признаки:

S_1 – повышенная вибрация корпуса;

S_2 – превышение допускаемого уровня шума на 2...4 дБ.

В качестве диагностируемых состояний приняты:

D_1 – износ шестерен;

D_2 – увеличенный радиальный зазор подшипника;

D_3 – нормальное (работоспособное) состояние (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Вероятности признаков и состояний

Класс объекта	$p(S_1 D)$	$p(S_2 D)$	$p(D)$
D_1	0,2	0,3	0,05
D_2	0,4	0,5	0,15
D_3	0	0,05	0,8

Пример решения

1 Рассчитаем вероятности принадлежности объектов классам D_1 , D_2 , D_3 по наблюдаемым единичным признакам S_1 и S_2 , а также по их отсутствию \bar{S}_1 и \bar{S}_2 по формуле

$$p(D_i|S_j) = p(D_i) \frac{p(S_j|D_i)}{\sum_{k=1}^3 p(S_k|D_i)}. \quad (1)$$

2 Рассчитаем вероятности принадлежности объектов классам D_1 , D_2 , D_3 по наблюдаемым парным признакам S_1 и S_2 , а также их отсутствию \bar{S}_1 и \bar{S}_2 по формуле

$$p(D_k|S_i S_j) = p(D_i) \frac{p(S_i S_j|D_k)}{p(S_i S_j)}. \quad (2)$$

3 Определим наиболее информативные комплексы признаков, превышающие порог принятия гипотезы.



Контрольные вопросы

- 1 Каковы достоинства и недостатки метода Байеса?
- 2 Какие комплексы признаков наиболее информативны для метода Байеса?
- 3 Как строятся решающие правила по методу Байеса?

2 Построение решающих правил

Задание

Построить на основе коэффициентов определенности и базы данных о состоянии механических передач систему для распознавания двух состояний:

D_1 – нормальное состояние («годна»);

D_2 – критическое состояние («не годна»).

В качестве критериев распознавания были выбраны следующие признаки:

S_1 – шум передачи не превышает 80 дБ;

S_2 – уровень виброускорения на корпусе передачи свыше 3 м/с²;

S_3 – содержание железа в масле менее 150 мг/л;

S_4 – температура корпуса передачи не превышает 70 °С.

Варианты заданий приведены в таблицах 2 и 3 и выбираются по номеру студента в списке учебной группы.

В таблицах 2 и 3 приведены типовые наблюдения за объектами трех типов, соответствующих состояниям D_1 и D_2 . При этом значение «1» соответствует наличию признака S_i , а значение «0» – его отсутствию. В правом столбце указано количество объектов базы данных $n_{об}$, для которых установлены соответствующие сочетания признаков S_i .

Таблица 2 – Варианты заданий

Состояние		D_1	S_1	S_2	S_3	S_4	$n_{об}$
Первая цифра номера в списке	0	Объекты 1-го типа	1	0	1	0	10
		Объекты 2-го типа	1	0	0	1	25
		Объекты 3-го типа	1	0	1	1	5
	1	Объекты 1 -го типа	0	1	0	1	15
		Объекты 2-го типа	1	1	0	1	25
		Объекты 3-го типа	1	1	0	0	10
	2	Объекты 1-го типа	1	0	0	1	10
		Объекты 2-го типа	1	0	1	0	20
		Объекты 3-го типа	1	0	1	1	10
	3	Объекты 1-го тина	1	0	1	0	10
		Объекты 2-го типа	0	0	1	1	25
		Объекты 3-го типа	1	0	0	1	5



Таблица 3 – Варианты заданий

Состояние		D_2	S_1	S_2	S_3	S_3	$n_{об}$
Вторая цифра номера в списке	1	Объекты 4-го типа	0	1	1	1	10
		Объекты 5-го типа	0	1	0	0	5
		Объекты 6-го типа	1	0	0	0	3
		Объекты 7-го типа	0	1	0	1	2
	2	Объекты 4-го типа	1	1	1	1	8
		Объекты 5-го типа	0	0	1	0	7
		Объекты 6-го типа	1	0	0	0	3
		Объекты 7-го типа	0	0	1	1	2
	3	Объекты 4-го типа	1	0	1	1	10
		Объекты 5-го типа	1	1	0	0	5
		Объекты 6-го типа	1	0	0	0	3
		Объекты 7-го типа	0	1	1	0	2
	4	Объекты 4-го типа	0	1	1	1	8
		Объекты 5-го типа	0	1	0	0	5
		Объекты 6-го типа	1	0	0	0	5
		Объекты 7-го типа	0	1	0	1	2
	5	Объекты 4-го типа	1	0	1	1	7
		Объекты 5-го типа	0	0	0	0	5
		Объекты 6-го типа	1	0	1	0	5
		Объекты 7-го типа	0	0	1	0	8
	6	Объекты 4-го типа	0	1	0	1	8
		Объекты 5-го типа	0	1	1	1	5
		Объекты 6-го типа	1	0	0	0	7
		Объекты 7-го типа	1	0	0	1	5
	7	Объекты 4-го типа	0	1	1	1	10
		Объекты 5-го типа	0	1	0	0	5
		Объекты 6-го типа	1	0	0	0	3
		Объекты 7-го типа	0	1	0	1	2
	8	Объекты 4-го типа	1	0	1	1	10
		Объекты 5-го типа	0	1	0	0	5
		Объекты 6-го типа	1	0	1	0	5
		Объекты 7-го типа	1	1	0	0	5
	9	Объекты 4-го типа	0	1	0	1	10
		Объекты 5-го типа	0	1	1	0	5
		Объекты 6-го тала	1	0	1	0	3
		Объекты 7-го типа	1	0	0	1	2
0	Объекты 4-го типа	1	0	0	1	10	
	Объекты 5-го типа	1	1	0	1	5	
	Объекты 6-го типа	1	0	0	0	3	
	Объекты 7-го типа	0	1	1	0	7	

Пример решения

1 Приняв в качестве базового состояния D_1 (нормальное состояние), рассчитаем значения коэффициентов определенности для каждого из признаков S_i по формулам

$$CF(S) = MD(S) - MHD(S);$$

$$MD(S_1) = \frac{n(S_1 = 1; D_1 = 1)}{n(D_1)};$$

$$MHD(S_1) = \frac{n(S_1 = 1; D_2 = 1)}{n(D_2)};$$

2 Проверим качество полученной системы коэффициентов определенности, оценив с их помощью принадлежность объектов типов 1...7 состояниям D_1 и D_2 . Объединение признаков 1 и 2 и т. д. рассчитываем по формуле

$$CF(S_1 \text{ и } S_2) = CF(S_1) + CF(S_2) \cdot (1 - |CF(S_1)|).$$

В качестве порога для принятия гипотезы выбираем положительное (отрицательное) значение коэффициента определенности для комбинации признаков, равное 0,7.

3 Определим величину ошибки системы распознавания (количество ошибочно распознанных примеров).

Контрольные вопросы

- 1 Что такое решающее правило?
- 2 В каком случае решающее правило не может быть построено?
- 3 При каких условиях можно применять решающее правило?

3 Построение нечетких множеств

Задание

По вариантам, выданным преподавателем, построить функции принадлежности нечетких переменных для системы управления натягом хонинговальных брусков для набора правил:

- 1) если момент на хоне высокий, то натяг низкий;
- 2) если момент на хоне средний, то натяг средний;
- 3) если момент на хоне низкий, то натяг высокий.



Пример решения

1 В качестве функции принадлежности принимаем треугольную или трапециевидную функции в форме выражений

$$\mu(M) = \frac{M - M_{ep}}{\Delta M} \quad (3)$$

или

$$\mu(M) = \frac{M_{ep} - M}{\Delta M}, \quad (4)$$

где M – текущее значение момента, Н·м;

M_{ep} – значение момента, соответствующее началу (концу) переходной зоны, Н·м;

ΔM – ширина переходной зоны, Н·м.

Интервал рабочих моментов – 0...400 Н·м; интервал натягов – 4...12 Н.

2 Построим графики функций принадлежности.

Контрольные вопросы

- 1 Чем отличается нечеткое множество от обычного?
- 2 Какие функции нечеткости используют на практике?
- 3 Что такое функция принадлежности?

4 Нечеткий вывод

Задание

Используя функции принадлежности, построенные в практической работе № 3, определить функцию управления натягом хонинговальных брусков по величине момента на приводном валу инструмента по методу центра тяжести (Мамдани).

Пример решения

1 Разбиваем интервал изменения момента на валу инструмента на 10 дискретных ступеней.

2 Определим истинность левой части правил («Если») правил для каждого значения момента дискретных ступеней по формулам (3) и (4).

3 Находим модификацию нечеткого множества, указанного в правой части («То») правил по формуле

$$\mu_{ТО}(x_i) = \mu_{ЕСЛИ}(x_i) \cdot \mu_{ПРАВИЛА}(x_i).$$



4 Определим композицию (суперпозицию) нечетких множеств методом «Или»:

$$\mu_{\Sigma} = \max\{\mu_{T_0}(x_i)\}.$$

5 Проводим дефаззификацию (переход к единственному значению) переменной по методу Мамдани (на основе определения центра тяжести) графическим методом, определив моду фигуры, соответствующей набору значений μ_{Σ} .

6 Построим график управления натягом хонинговальных брусков по величине момента на приводном валу.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое композиция в нечетком выводе?
- 2 Что такое дефаззификация?
- 3 В чем сущность дефаззификации по методу Мамдани?

5 Метрическое распознавание образов

Задание

Для оценки состояния подшипниковых опор редуктора в сборе предложено использовать сигналы двух преобразователей виброускорений x_1 и x_2 , смонтированных, соответственно, над передней и задней опорами ведомого вала. Установлено, что на основе анализа этих сигналов можно разделять редукторы на два следующих класса:

- *класс 1*: работоспособное состояние (замена подшипников не требуется);
- *класс 2*: критическое состояние (требуется замена подшипников, износ которых достиг предельного значения).

По результатам исследований партии редукторов определить эталоны (средние значения) E_1 и E_2 этих классов.

Определить состояние объектов O_1 и O_2 по сигналам преобразователей $x_1(O_1)$, $x_2(O_1)$ и $x_1(O_2)$, $x_2(O_2)$ на основе методики метрического распознавания образов.

Варианты заданий приведены в таблицах 4 и 5 и выбираются по номеру студента в списке учебной группы.

Таблица 4 – Варианты заданий

Вторая цифра номера	$x_1(E_1)$	$x_2(E_1)$	$x_1(E_2)$	$x_2(E_2)$	$x_1(O_1)$	$x_2(O_1)$	$x_1(O_2)$	$x_2(O_2)$
0	6	2	18	10	5	10	17,3	7
1	1,5	1,2	10	5,5	9	4,5	4,5	4
2	1,5	1	10	12	1,5	4	10	5,5
3	1,7	6	14	14	5	4	5,7	12



Окончание таблицы 4

Вторая цифра номера	$x_1(E_1)$	$x_2(E_1)$	$x_1(E_2)$	$x_2(E_2)$	$x_1(O_1)$	$x_2(O_1)$	$x_1(O_2)$	$x_2(O_2)$
4	1	7	18	10	4,3	5	11	10
5	3,6	3	12	12	14,3	9	10	4
6	4	4	13	15	5	12	5	5
7	4	2	18	14	15,3	5,3	5	6
8	2	6	14	12	6,5	10	4	5
9	5,6	4,1	18	13	9	12	4,3	5

Таблица 5 – Варианты заданий

Первая цифра номера	m_1	m_2	m_3
0	2	0,23	6
1	2	0,15	8
2	2	0,28	7
3	2	0,2	7

Пример решения

1 Построим графическое изображение образцов и рассчитанных эталонов E_1 и E_2 , а также объектов O_1 и O_2 в пространстве признаков x_1 и x_2 .

2 Определим расстояния от исследуемых объектов O_1 и O_2 до эталонов классов E_1 и E_2 при показателях степени обобщенного расстояния m_1, m_2, m_3 , а также определим надежности принадлежности объектов классам 1 и 2.

В качестве меры расстояния между эталоном и объектом принимаем обобщенную метрику

$$L = \sum_{k=1}^n |E_k - O_k|^m, \quad (5)$$

где n – размерность пространства признаков;

m – показатель степени обобщенного расстояния.

3 Порог надежности для принятия гипотезы о принадлежности объекта выбранному классу состояний принимаем равным 0,7.

4 Оценим влияние показателя степени m (меры резкости пространства) на надежность распознавания.

Контрольные вопросы

1 В чем заключается процедура метрического распознавания образов?

2 Что такое метрика пространства?

3 Как влияет метрика пространства на надежность распознавания?



6 Обучение распознаванию образов

Задание

Используя центроидный метод и метод, базирующийся на процедуре обучения, обучить систему распознаванию двух классов состояний механических передач:

- работоспособное (класс 1);
- неработоспособное (класс 2).

При этом в качестве представителей первого класса выбраны объекты P_1 и P_2 , а в качестве представителей второго класса – объекты P_3 и P_4 . Объекты характеризуются двумерным набором признаков – x_1 и x_2 .

Варианты заданий приведены в таблице 6 и выбираются по номеру студента в списке учебной группы.

Таблица 6 – Варианты заданий

Номер по списку	Работоспособное состояние				Неработоспособное состояние			
	P_1		P_2		P_3		P_4	
	x_1	x_2	x_1	x_2	x_1	x_2	x_1	x_2
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1	2	1	6	7	8	9
2	2	3	1	2	8	6	7	9
3	1	1	2	2	6	7	8	5
4	1	2	1	0	9	8	6	7
5	2	1	1	3	7	6	9	8
6	1	2	3	1	6	6	7	8
7	0	1	1	3	5	6	7	7
8	1	1	2	3	6	8	8	9
9	2	0	0	1	7	6	9	7
10	1	1	3	1	6	8	7	5
11	0	1	2	1	5	7	6	8
12	3	2	1	1	8	9	9	10
13	2	3	4	0	7	8	10	9
14	2	4	3	2	7	9	8	6
15	1	1	3	2	8	7	8	10
16	2	3	3	4	8	8	9	9
17	2	2	4	3	8	7	9	8
18	1	0	2	2	6	8	8	9
19	1	0	2	1	7	6	8	7
20	0	1	2	2	7	6	8	8
21	2	3	4	2	8	9	9	10
22	1	3	2	1	8	7	9	9

Окончание таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
23	1	0	2	1	8	9	9	10
24	1	1	0	3	7	9	8	10
25	4	3	3	2	9	9	10	11
26	2	1	3	3	7	8	9	8
27	2	0	1	3	8	7	9	11
28	2	1	3	1	8	7	8	10

Пример решения

1 Рассчитаем центры классов и найдем выражение для дискриминантной функции. Определим принадлежность объектов $P_1 \dots P_4$ класса 1 и 2.

2 Используя алгоритм обучения, найдем выражение для дискриминантной функции.

3 Сравним результаты, полученные в пп. 1 и 2.

Контрольные вопросы

1 В чем заключается смысл обучения распознаванию образов?

2 Что такое дискриминантная функция?

3 В чем заключается проблема линейной делимости образов?

7 Построение нейронных сетей**Задание**

С помощью нейронной сети, состоящей из одного нейрона с одним входом x_1 , построить процедуру, позволяющую предсказать изменение размера токарного резца l во времени t , связанное с его износом.

Предполагается, что размер резца (расстояние от некоторой измерительной базы на передней поверхности резца до его режущей кромки) изменяется прямо пропорционально времени при обработке с постоянными режимами резания (т. е. когда путь резания пропорционален времени).

Варианты заданий приведены в таблице 7 и выбираются по номеру студента в списке учебной группы.



Таблица 7 – Варианты заданий

Номер по списку	Размер резца l , мм, при времени обработки t , мин			
	0	5	10	15
1	10,16	10,08	10,06	9,99
2	10,14	10,12	10,03	10,02
3	10,15	10,08	10,06	10,00
4	10,14	10,12	10,07	10,00
5	10,13	10,11	10,07	9,98
6	10,15	10,12	10,07	9,99
7	10,15	10,08	10,04	10,01
8	10,17	10,09	10,04	10,01
9	10,15	10,12	10,05	9,98
10	10,15	10,08	10,05	9,99
11	10,14	10,08	10,07	10,00
12	10,16	10,08	10,03	10,02
13	10,13	10,10	10,03	9,99
14	10,15	10,09	10,04	10,01
15	10,13	10,10	10,04	10,02
16	10,13	10,11	10,05	10,00
17	10,15	10,08	10,04	9,99
18	10,16	10,08	10,03	9,98
19	10,15	10,09	10,04	10,01
20	10,14	10,11	10,03	10,02
21	10,15	10,08	10,03	9,98
22	10,17	10,10	10,03	10,00
23	10,15	10,11	10,07	10,00
24	10,14	10,09	10,03	10,00
25	10,17	10,12	10,04	10,02
26	10,15	10,12	10,07	10,01

Пример решения

1 Используя метод наименьших квадратов, найдем зависимость размера резца от времени в форме

$$\hat{l} = l_0 + kt, \quad (6)$$

где \hat{l} – текущий размер резца;
 l_0 – размер резца в начальный момент времени;
 k – интенсивность износа во времени;
 t – текущий момент времени.

2 Найдем зависимость размера резца от времени в форме (6), обучив нейронную сеть. В качестве начальных приближений принимаем значение l из таблицы 7 в момент времени $t = 0$.

При нахождении коэффициента k используем упрощенную формулу

$$k_{n+1} = k_n + c \cdot (l_{\text{экс}} - l_{\text{мод}}), \quad (7)$$

где k_{n+1} и k_n – значения коэффициента k после и до корректировки;

c – коэффициент скорости обучения (норма обучения);

$l_{\text{экс}}$ – экспериментальное (требуемое) значение размера, приведенное в таблице 7;

$l_{\text{мод}}$ – модельное (расчетное) значение размера, полученное по формуле (6).

В качестве начальных приближений принимаем значения коэффициента $k = 0$. Коэффициент скорости обучения принимаем равным 0,1.

3 Сравним результаты, полученные в пп. 1 и 2, а также трудоемкость вычислений.

Контрольные вопросы

- 1 Какова структура искусственного нейрона?
- 2 Какую структуру имеют сети архитектуры MLP?
- 3 В чем сущность обучения нейронных сетей?

8 Методы обучения сетей

Задание

Для вариантов заданий, приведенных в таблице 7, изучить процедуру обучения сети из одного нейрона на основе правила Видроу-Хоффа.

В качестве критерия ошибки сети выбрать критерий остаточной суммы

$$S_{\text{ост}} = \sum_i (l_{i_i} - l_{oi})^2. \quad (8)$$

Пример решения

1 Получим выражение для производной по весовому коэффициенту нейрона w_1 , совпадающего с коэффициентом k модели (6):

$$\frac{\partial S_{\text{ост}}}{\partial k} = \frac{\partial S_{\text{ост}}}{\partial l_{oi}} \cdot \frac{\partial l_{oi}}{\partial out_i} \cdot \frac{\partial out_i}{\partial k}. \quad (9)$$

Так как в соответствии с (8)



$$\frac{\partial S_{ocm}}{\partial l_{oi}} = -2(l_{ti} - l_{oi}), \quad (10)$$

для линейной функции активации

$$\frac{\partial l_{oi}}{\partial out_i} = f'(l_0 + kt) = 1, \quad (11)$$

а в соответствии с формулой (6)

$$\frac{\partial out_i}{\partial k} = t_i, \quad (12)$$

то формула (9) примет вид:

$$\frac{\partial S_{ocm}}{\partial k} = -2(y_{ti} - y_{oi})t_i. \quad (13)$$

Введем обозначение

$$\delta_i = (y_{ti} - y_{oi}), \quad (14)$$

получим формулу Видроу-Хоффа для вычисления корректировки весового коэффициента k пропорционально ошибке, допущенной сетью:

$$\Delta k = c\delta_i t_i. \quad (15)$$

Формула (15) представляет собой формулу алгоритма обратного распространения ошибки для нейрона с линейной функцией активации. В ней дополнительно введена *норма обучения* c , которая изменяется в интервале от 0 до 1.

2 Получим приближения для коэффициента k после нескольких вычислительных итераций.

Контрольные вопросы

- 1 В чем заключается идея обратного распространения ошибки?
- 2 В чем суть правила Видроу-Хоффа?
- 3 Чем определяется скорость обучения в алгоритме обратного распространения ошибки?



Список литературы

1 **Масленникова, О. Е.** Основы искусственного интеллекта : учебное пособие / О. Е. Масленникова, И. В. Гаврилова. – 2-е изд., стер. – Москва : ФЛИНТА, 2013. – 282 с.

2 **Осипов, Г. В.** Методы искусственного интеллекта / Г. В. Осипов. – Москва : Физматлит, 2011. – 296 с.

3 **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2007. – 452 с.

4 **Ярушкина, Н. Г.** Основы теории нечетких и гибридных систем : учебное пособие / Н. Г. Ярушкина. – Москва : Финансы и статистика, 2004. – 320 с.

5 **Боровиков, В. П.** Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks / В. П. Боровиков. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2008. – 182 с.

6 **Биргер, И. А.** Техническая диагностика / И. А. Биргер. – Москва : Машиностроение, 1978. – 240 с.

7 **Боровская, Е. В.** Основы искусственного интеллекта / Е. В. Боровская, Н. А. Давыдова. – 3-е изд. – Москва : Лаборатория знаний, 2016. – 130 с.

8 **Сергеев, Н. Е.** Системы искусственного интеллекта : учебное пособие / Н. Е. Сергеев. – Таганрог : Южный фед. ун-т, 2016. – Ч. 1. – 118 с.

