

Нейросетевая технология моделирования таксационных показателей лесоматериалов

В.В. Побединский^{1a}, Н.Н. Теринов^{2, 3b}, И.Н. Кручинин^{2c}, А.В. Берстеньев^{4d},
А.Ю. Чевардина^{2e}, Р.Н. Ковалев^{1f}

¹ Уральский государственный аграрный университет, ул. Карла Либкнехта, 42, Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия

³ Ботанический сад Уральского отделения РАН, ул. 8 Марта, 202а, Екатеринбург, Россия

⁴ КБ «Новатор», пр. Космонавтов, 18, Екатеринбург, Россия

^a pobedinskyvv@mail.ru, ^b n_n_terinov@mail.ru, ^c kinaa.k@yandex.ru, ^d berstenevandr@mail.ru,

^e anis401@yandex.ru, ^f kovalevrn@m.usfeu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-7598-9672>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8986-2851>, ^e <https://orcid.org/0009-0009-7179-8973>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-8928-8765>

Статья поступила 26.12.2023, принята 25.01.2024

Рассмотрена проблема цифрового прототипирования предмета труда лесопромышленных технологий. В качестве объекта исследований приняты хлысты деревьев ели. В технологии прототипирования в данном случае должна решаться задача параметрического построения 3D модели, что предусматривает наличие соответствующего математического описания объекта. Для моделирования таксационных показателей могут использоваться известные таксационные данные, которых собрано огромное количество. Но в данном случае цифровое прототипирование предусматривает параметрическое построение ствола лесоматериала, и нужны различные функциональные зависимости, которые в существующих таксационных базах практически отсутствуют. Следовательно, для решения проблемы необходим принципиально новый подход, что и определило цель настоящей работы. Цель исследований заключается в создании нейросетевой технологии для моделирования таксационных показателей лесоматериала. Для достижения цели решались следующие задачи: 1) обоснование таксационных показателей, необходимых для создания цифрового прототипа хлыста ели; 2) проведение экспериментальных исследований для сбора статистических данных и формирования обучающей выборки нейронной сети; 3) разработка нейронной сети в среде MATLAB; 4) проверка адекватности нейронной сети на тестовых примерах; 5) разработка в среде MATLAB имитационной модели на основе нейронной сети для расчета таксационных показателей. В работе использованы методы лесной таксации, нейронных сетей, визуально-блочного имитационного моделирования. В качестве результатов предложена нейросетевая технология, включающая нейронную сеть и имитационную модель для расчетов таксационных показателей лесоматериалов, которые необходимы для создания цифровых прототипов лесоматериалов как предмета труда любых лесопромышленных технологий.

Ключевые слова: таксационные показатели; нейронная сеть; имитационная модель для расчета таксационных показателей.

Neural network technology for modeling timber taxation indicators

V.V. Pobedinsky^{1a}, N.N. Terinov^{2, 3b}, I.N. Kruchinin^{2c}, A.V. Berstenev^{4d},
A.Yu. Chevardina^{2e}, R.N. Kovalev^{1f}

¹ Ural State Agricultural University; 42, Karl Liebknecht St., Ekaterinburg, Russia

² Ural State Forestry Engineering University; 37, Sibirsky Trakt St., Ekaterinburg, Russia

³ Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS; 202a, 8 Marta St., Ekaterinburg, Russia

⁴ Experimental Design Bureau "Novator" JSC; 18, Kosmonavtov Pros., Ekaterinburg, Russia

^a pobedinskyvv@mail.ru, ^b n_n_terinov@mail.ru, ^c kinaa.k@yandex.ru, ^d berstenevandr@mail.ru,

^e anis401@yandex.ru, ^f kovalevrn@m.usfeu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-6318-3447>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-5936-208X>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-7598-9672>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8986-2851>, ^e <https://orcid.org/0009-0009-7179-8973>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-8928-8765>

Received 26.12.2023, accepted 25.01.2024

The problem of digital prototyping of the object of labor of forestry technologies is considered. The whips of spruce trees are accepted as the object of research. In prototyping technology, in this case, the problem of parametric construction of a 3-D model should be solved, which provides for the presence of an appropriate mathematical description of the object. To model the taxation indicators, a huge amount of taxation data can be used. But in this case, digital prototyping provides for the parametric construction of the timber trunk and various functional dependencies are needed, which are practically absent in the existing tax bases. Consequently, a fundamentally new approach is needed to solve the problem, which determines the purpose of the current work. The purpose of the research

is to create a neural network technology for modeling timber taxation indicators. To achieve the goal, the following tasks are solved: 1) substantiation of the taxation indicators necessary to create a digital proto-type of a whip of spruce); 2) conducting experimental studies to collect statistical data and form a training sample of a neural network; 3) development of a neural network in MATLAB; 4) verification of the adequacy of a neural network on test examples; 5) development of a simulation model based on a neural network for calculating tax indicators in MATLAB. The methods of forest taxation, neural networks, and visual block simulation modeling are used in the work. As a result, a neural network technology is proposed, including a neural network and a simulation model for calculating the taxation indicators of timber, which are necessary for the construction of digital prototypes of timber, as the subject of labor of any timber technologies.

Keywords: taxation indicators; neural network; simulation model for calculating taxation indicators.

Введение. В настоящее время в ходе четвертой технологической революции одним из самых перспективных направлений стала технология цифрового прототипирования. Такая технология позволяет уже на стадии проектирования исследовать изделие, промоделировать продукт в цифровом виде и создать его более качественным и функциональным.

В этой технологии центральное место занимает цифровой прототип, а именно цифровая модель изделия или объекта, на которой выполняются имитационные испытания его функций и свойств [1; 2].

В лесопромышленных технологиях цифровое прототипирование имеет свои специфические особенности. Проектирование машин, оборудования, процессов, технологических схем выполняется в расчете на параметры предмета труда, как правило, это лесоматериалы.

Традиционно принимаются некоторые усредненные таксационные показатели, и по ним выполняются проекты. Но таксационные показатели варьируются в широких пределах в зависимости от породы, возраста, места произрастания, климатических условий, поэтому обеспечить достаточную точность проектирования чрезвычайно сложно. Решить данную проблему позволит разработка цифрового прототипа лесоматериала.

В настоящее время имеется большое количество таксационных данных, но для построения цифровых прототипов нужны функциональные зависимости. Несмотря на огромное количество данных, нужного математического описания не существует. Таким образом, стала актуальной проблема разработки нового подхода к оценке таксационных показателей, а самым универсальным инструментарием в настоящее время являются искусственные нейронные сети и имитационное моделирование в его современной концепции визуально-блочного объектно-ориентированного моделирования.

Таким образом, определилась *цель настоящей работы*, которая заключается в создании нейросетевой технологии для моделирования таксационных показателей лесоматериалов.

Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1) обоснование таксационных показателей, необходимых для создания цифрового прототипа хлыста на примере породы «ель»;

2) проведение экспериментальных исследований для сбора статистических данных и формирования обучающей выборки нейронной сети;

3) разработка нейронной сети в среде MATLAB;

4) проверка адекватности нейронной сети на тестовых примерах;

5) разработка в среде MATLAB имитационной модели на основе нейронной сети для расчета таксацион-

ных показателей.

Методы и материалы. В работе использованы методы лесной таксации, построения нейронных сетей [3–8], визуально-блочного имитационного моделирования [6]. Для обработки экспериментальных данных использованы методы математической статистики. Программная реализация нейронной сети и имитационной модели выполнена в среде компьютерной математики MATLAB [9].

Результаты. Разработка нейросетевой технологии моделирования таксационных показателей лесоматериалов включает выполнение следующих процедур.

Вначале необходимо обоснование тех таксационных показателей, которые будут использоваться именно для моделирования. Затем разрабатывается нейронная сеть. Поскольку ряд параметров будет статистически моделироваться при построении цифрового прототипа, потребуется разработать имитационную визуально-блочную модель с интерфейсом и нейронной сетью.

Для построения модели лесоматериала, а именно определение перечня таксационных показателей для цифрового моделирования, в нашем случае принимается хлыст ели. Для этого необходимо выделить группы основных параметров.

В этом месте задача прототипирования лесоматериала разделяется на две подзадачи, т. е. вначале выполняется параметрическое построение формы ствола, а затем моделируются видимые пороки (по ГОСТ 2140-81) [10]. Таким образом, построение модели начинается с определения геометрических данных ствола. Поэтому следует в первую очередь определить эту группу параметров, которая включает длину хлыста, толщину, кривизну, овальность. Последние три параметра коррелируют в той или иной степени с длиной хлыста.

В лесной таксации толщина ствола определяется через показатель его диаметра на высоте груди и, наряду с высотой дерева, является основным таксационным показателем для определения объема ствола [11]. Соотношение между высотами и диаметрами деревьев зависит от древесной породы [12], ее возраста [13–16], густоты (полноты) древостоя [17], условий местопроизрастания [18–24]. Изменчивость этого соотношения даже в пределах таксационного выдела может быть достаточно высокой [25].

Кроме того, толщина, кривизна и овальность ствола — величины непостоянные и изменяются по всей длине дерева. Такие данные практически отсутствуют, что еще раз показывает невозможность достаточно адекватно построить модель статистическими методами. Для процесса моделирования следует определить основные функциональные зависимости.

Доминирующим показателем для описания сортообразующих пороков древесины является толщина

круглых лесоматериалов. Данный параметр зависит, в свою очередь, от породы дерева, сортиментной структуры и других природно-климатических и производственных особенностей. Толщина круглых лесоматериалов как случайная величина описывается вероятностно. Принято считать, что на длину (высоту и в целом продуктивность) древостоя, в первую очередь влияют климатические факторы [19; 20], продолжительность сезона роста, плодородность почвы [21; 22], наличие лесных пожаров в регионе [23], а устойчивой закономерности, устанавливающей связь величины толщины круглого лесоматериала и длины хлыста не выявлено. Поэтому возможно использовать статистические величины, представленные в таксационных таблицах [24; 25]. Для определения параметров диаметра нижнего торца могут использоваться таблицы объемов [26–28].

Другой показатель — овальность — определяется по ГОСТ 2140-81 как форма поперечного сечения торца круглого лесоматериала, у которого больший диаметр не менее, чем в 1,5 раза превышает меньший [26]. Овальность ствола измеряют по разности между наибольшим и наименьшим диаметрами соответствующего торца лесоматериала.

Еще один существенный показатель — это кривизна. По ГОСТ 2140-81 он определяется как отклонение продольной оси сортимента от прямой линии, обусловленное искривлением ствола. Выделяют простую кривизну, характеризующуюся только одним изгибом сортимента, и сложную кривизну, характеризующуюся двумя и более изгибами сортимента в одной или нескольких плоскостях. Согласно п. 4.3.4 ГОСТ 2140-81, простую кривизну измеряют по отклонению от прямолинейности сортимента в месте наибольшего искривления и выражают в сантиметрах на 1 м длины искривления или в процентах от длины искривления. Рассчитывается степень простой кривизны хлыста, z , по следующей формуле [26]:

$$z = a / L, \quad (1)$$

где a — величина стрелы максимального прогиба; L — длина хлыста.

Возможно наличие сложной кривизны, характеризующейся величиной наибольшего искривления и измеряемого аналогично простой кривизне. Кривизна может быть одинарной и множественной. Множественная может наблюдаться в разных направлениях по окружности. Если рассматривается хлыст ели, то для этой породы множественная кривизна не является характерной, и этим показателем можно пренебречь.

Из анализа таксационных показателей следует, что длины и толщины хлыста являются определяющими для всех остальных показателей формы хлыста. Также и показатель кривизны, оцениваемый параметром величины стрелы прогиба, коррелирует с длиной хлыста. От параметров толщины и высоты дерева зависит сбежистость ствола. Степень сбежистости ствола, как и многие таксационные признаки, зависит от древесной породы и условий местопроизрастания. Так хвойные породы имеют меньшую сбежистость по сравнению с лиственными. Деревья в древостое также имеют меньшую сбежистость по сравнению с единичными деревьями или деревьями в редицах. Также положительное

влияние на форму ствола оказывают почвенные условия: с увеличением класса бонитета сбежистость уменьшается. По сбежистости стволы подразделяются на сбежистые, среднесбежистые и слабосбежистые [26]. Наиболее точно будет учитывать различные участки ствола, для такого метода оценки сбежистости может использоваться корреляционная зависимость, предложенная проф. З.Я. Нагимовым [26].

Наибольшую сложность для математического описания и параметрического построения 3D-модели лесоматериала представляет закомелистость, которая может определяться пятью основными параметрами — количеством ребер; высотой ребер; вдоль ствола — длиной ребер, т. е. протяженностью до места, где высота ребра становится равной нулю; шириной ребер и местом расположения центра ребра по окружности ствола. Очевидно, что параметры закомелистости зависят главным образом от толщины ствола. В случае дальнейшего имитационного статистического моделирования для некоторых параметров потребуется значение их среднеквадратичных отклонений (СКО) а также вид статистических распределений этих случайных величин.

Таким образом, параметрами моделирования, определяющими форму ствола породы «ель», являются следующие таксационные показатели.

1. Длина хлыста, L , м
2. Толщина на уровне 1,3 м, $D_{1,3}$, м
3. Сбежистость, $Cб$, %
4. Величина стрелы прогиба (кривизна), $Kр$, %
5. Овальность, O , %
6. Количество ребер, ед., N
7. Средняя высота ребра, см, h_{cp}
8. СКО средней высоты ребра h_{cp} , см, Dh
9. Средняя длина ребра, м; $l_{cp} = f(D_{1,3})$
10. СКО средней длины ребра, см, Dl_{cp}
11. Высота i -го ребра, см, hi
12. Длина i -го ребра, м, li
13. Координаты расположения каждого центра i -го ребра по окружности ствола, град.; ki
14. Ширина i -го ребра, см, Si

Как было определено, из приведенного списка основными и исходными параметрами для моделирования всех остальных являются длина и толщина ствола хлыста. Первоначально эти параметры в прикладных задачах определяются путем статистического моделирования с заданным законом распределения случайной величины. Аналогично методом статистического моделирования определяются параметры высоты, hi , длины i -го ребра, li , ширины ребра Si и координата расположения каждого ребра закомелистости по окружности.

Проведение экспериментальных исследований для сбора статистических данных и формирования обучающей выборки нейронной сети. Первой процедурой разработки нейронной сети является формирование набора обучающих выборок с перечнем определенных выше таксационных показателей. В данном случае следовало собрать таксационные показатели для хлыстов породы «ель». Исследовались заготовки лесоматериалов лесопромышленных предприятий Свердловской области. В результате статистические данные сформированы в банке таксационных данных по 40 хлыстам ели (см. табл. 1).

Разработка нейронной сети в среде MATLAB. Для разработки нейронной сети в данном случае предусмотрено настроить рекуррентную сеть на два входных и восемь выходных параметров, затем экспортировать созданную нейросеть в виде модели из блоков *Simulink* и проверить на тестовых примерах.

Для реализации модели в системе MATLAB [9] выбрано приложение *nnstart*, в котором задаются тип нейронной сети и ее структура (рис. 1). В данном случае принята сеть прямого распространения, по одному

слою входа, выхода и с одним скрытым слоем. После импорта исходных данных (см. рис. 2) выбирается метод обучения (по умолчанию — *Levenberg – Marquardt*), количество нейронов в скрытом слое (вначале принимается по умолчанию 10 нейронов), и распределяется количество обучающих выборок для процедур *Training, Validation* и *Test* (см. рис. 3).

После запуска процедуры *Train* контроль результатов процесса обучения может выполняться практически по всем значимым параметрам (см. рис. 4; 5, а).

Таблица 1. Банк таксационных данных по форме ствола хлыстов ели

Длина, <i>L, м</i>	Толщина, <i>Д1,3, см</i>	Овальность, <i>O, %</i>	Кривизна, <i>Kp, %</i>	Сбег, <i>Сб, %</i>	Количество ребер, <i>N</i> <i>ребер</i>	Средняя высота ребра, <i>hcp</i>	СКО <i>hcp,</i> <i>Dh, см</i>	Средняя длина ребра, <i>lcp, см</i>	СКО <i>lcp, Dlcp,</i> <i>см</i>
18	56	4	3	4	1	7	0	82	0
12	44	3	2	4	2	6	3	61	12
14	48	5	4	5	1	5	0	63	0
20	58	4	3	3	3	8	5	93	15
11	42	3	1,5	2,5	2	4	2	57	4
16	50	3	2	3,5	3	5	3	68	10
19	52	4	4	2,5	4	6	4	72	16
10	42	2	2	4	1	7	0	48	0
18	52	3	3	3	3	8	4	94	20
12	42	3	4	3	4	8	5	47	8
15	48	4	3,5	4	3	6	5	71	6
14	44	4	3	3	2	5	2	49	15
22	65	6	5	3,5	3	9	6	95	17
20	60	5	3	3	3	11	7	110	19
13	40	3	2,5	3	2	5	2	53	11
21	62	2	4	4	3	8	6	96	17
17	54	3	3	3,5	4	7	5	77	12
9	39	1,5	4	4	3	5	5	43	7
15	52	2,5	4	3	3	5	3	54	5
10	37	1,5	3	2,5	3	4	2	37	4
12	41	2	1,5	3,5	2	7	1	46	7
11	39	3	2	3,3	2	6	4	49	11
15	44	2,5	1	2,5	3	7	5	52	9
20	59	3	3	2,5	4	11	6	105	22
12	41	4	3,5	3	3	7	4	54	16
13	42	3	2	3	2	5	4	57	12
10	35	3	4	3	2	5	3	45	11
16	44	2,5	1	2,5	3	7	4	47	9
11	37	2	3	3	2	5	3	42	13
14	42	2	2	3	1	6	0	39	0
9	43	2	4	4	2	4	2	35	11
12	40	3	1	3,5	3	4	2	41	9
18	53	4	1,5	2,5	3	7	4	85	13
19	54	3	2	2,5	4	8	5	78	11
9	37	2	2,5	3	1	6	0	65	0
11	36	3	3	2,5	3	5	3	49	8
13	41	3	1	2	3	6	3	54	9
15	42	2	4,5	2,5	4	5	2	45	8
9	41	2	2	3	2	6	3	43	11
12	39	3	3	3,5	3	7	3	51	13

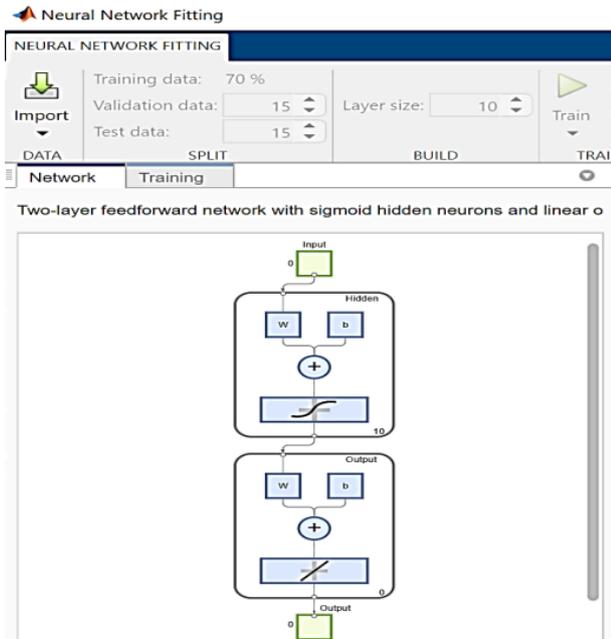


Рис. 1. Задание структуры нейросети

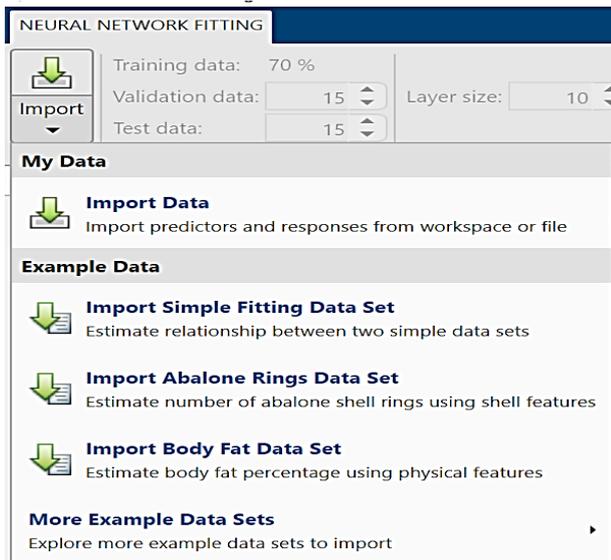


Рис. 2. Фрагмент задания исходных данных

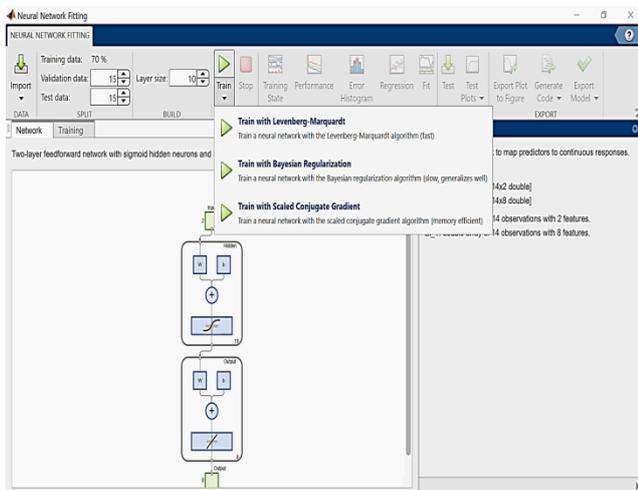


Рис. 3. Задание метода обучения

После завершения настройки во всех трех процедурах настроенная нейросеть может экспортироваться как в виде скрипта, так и в *Simulink*-формате (см. рис. 5, в). Для ее построения использованы блоки *Fitting Neural Network*, где расположена нейросеть, блока *Constant* («Исходные данные») с вектором исходных данных. Для вывода результатов расчета в графическом виде использован блок виртуального осциллографа «Графики» с выводом данных в виде графиков расчетных сигналов (см. рис. 5, з), где график каждой выходной переменной изображен своим цветом. Для числового формата выходных данных использован блок *Display* «Результаты».

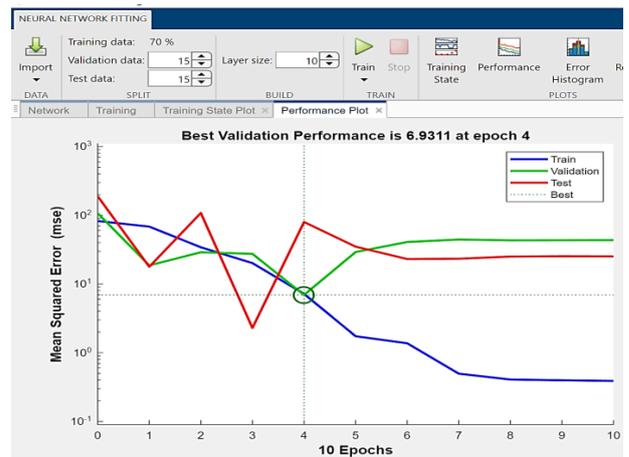
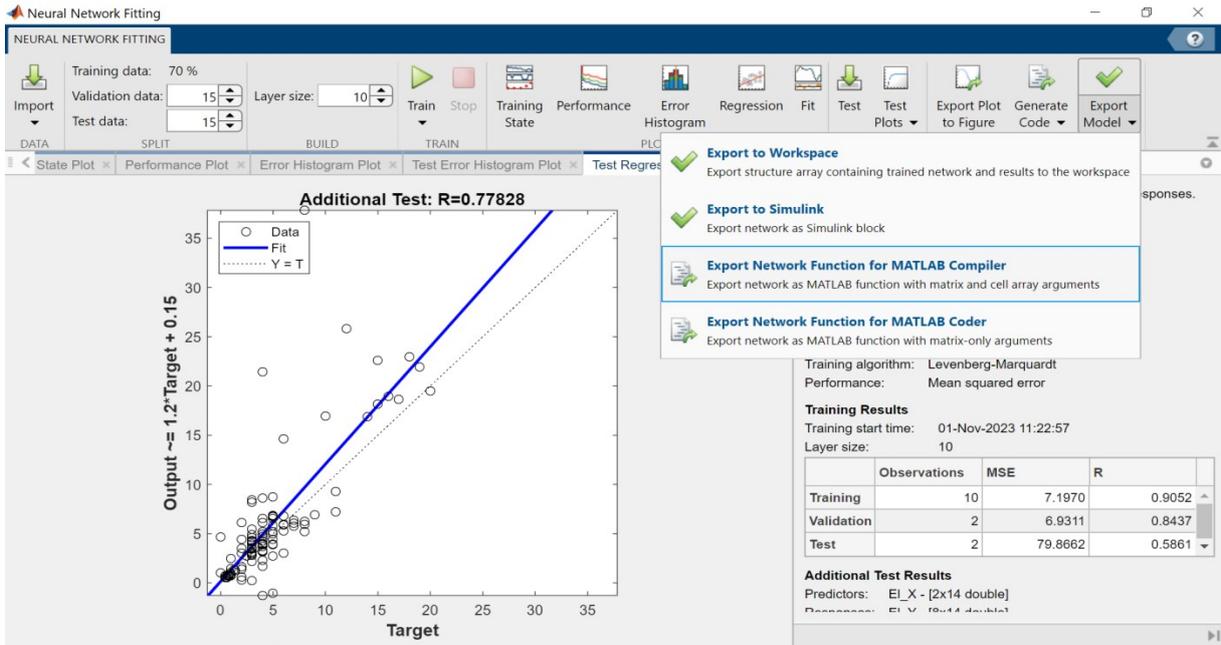


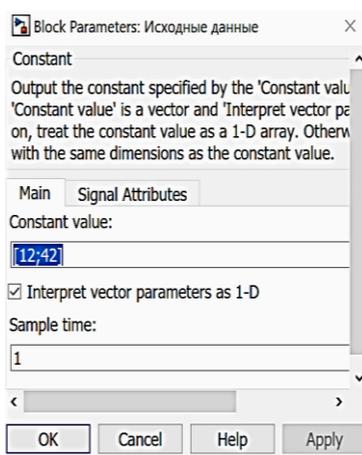
Рис. 4. Результаты процесса обучения

Для проверки адекватности нейросети были проверены расчеты по входным данным всех обучающих выборок. Исходные данные вводились в блок «Исходные данные» (обозначены затененными) (рис. 5, б), а вектор из восьми расчетных таксационных показателей выводился на дисплей (рис. 5, в) и осциллограф (рис. 5, з).

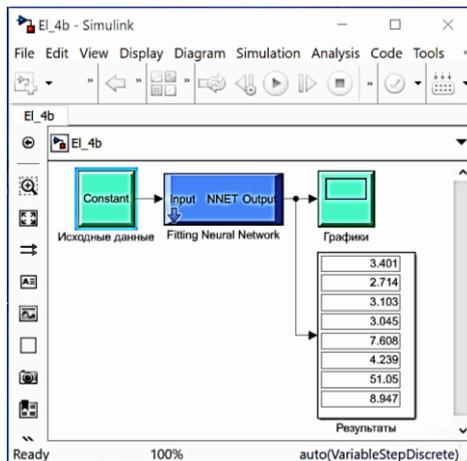
Для проверки адекватности настроенной сети выполнено сравнение расчетных и экспериментальных данных. Большая часть расчетных данных полностью совпадала с экспериментальными, около 30 % имели расхождение не более 8 % и около 10 % имели различие до 15 %. Повысить точность в данном случае позволит увеличение набора обучающих данных. Также в программе предусмотрено увеличение количества нейронов и количества эпох обучения, что увеличивает точность настройки. Но, учитывая специфику данных и широкий диапазон варьирования таксационных показателей, можно считать предложенную нейронную сеть достаточно адекватной для практических расчетов в лесопромышленных технологиях.



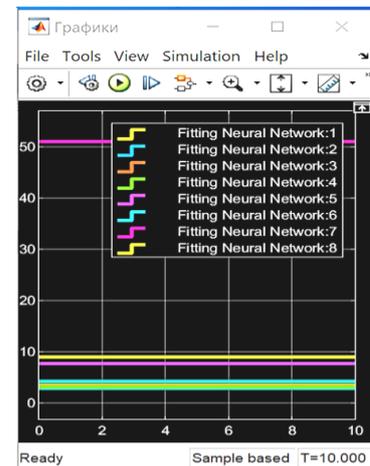
a)



б)



в)



г)

Рис. 5. Контроль точности, создание файла нейросети в *Simulink*-формате и работа с нейросетью: *a* — контроль точности обучения и экспорт нейросети в блоках *Simulink*; *б* — ввод исходных данных в блок *Constant*; *в* — модель в *Simulink*-формате и вывод результатов на дисплей в числовом виде; *г* — результаты расчетов в графическом виде

Разработка в среде MATLAB имитационной модели на основе нейронной сети для расчета таксационных показателей. Для практического использования технологии все разработанные элементы интегрируются в обобщенную имитационную *Simulink*-модель (рис. 6). В модели исходные данные задаются в блоках *Constant*. Для параметров, например, L и DI , 3 , которые моделируются случайным образом, используются блоки *MATLAB Function*, где создается функция с программным кодом для статистического моделирования по заданному закону распределения. Эти параметры моделируются по нормальному закону распределения. Исходные переменные затем подаются в мультиплексор, где формируется одномерный вектор параметров для последовательной передачи на вход нейросети. Нейросеть содержится в блоке *Fitting Neural Network*. Результаты расчетов нейросети, восемь выходных параметров, передаются через мультиплексор на осциллограф, дисплей,

в рабочую область и файл данных. Для дальнейшего моделирования комлевой части в блоках *MATLAB Function* моделируются для каждого i -го ребра высота, длина ребер, ширина ребер и их расположение по окружности (блоки «Длина i -х ребер» и «Высота i -х ребер»). Параметры высоты и длины моделируются по нормальному закону распределения, значения математических ожиданий и среднего квадратического отклонения передаются от нейросети. Для моделирования расположения ребер по окружности и ширины ребер в блоки «РебраПоОкружности» и «ШиринаРебер» передается рассчитанное по нейросети количество ребер. Расположение их моделируется по равномерному закону.

Во внешних файлах *.mat и out.* формируются результаты всех расчетов таксационных параметров лесоматериала. Они нужны для цифрового прототипирования и графического представления лесоматериала в 3D- модели.

На рис. 6 изображено конечное состояние модели после выполнения всех расчетов, это видно по экранам дисплеев с результатами моделирования.

В качестве результатов предложены нейронная сеть

и имитационная модель для расчетов таксационных показателей лесоматериалов, которые необходимы для создания цифровых прототипов лесоматериалов как предмета труда любых лесопромышленных технологий.

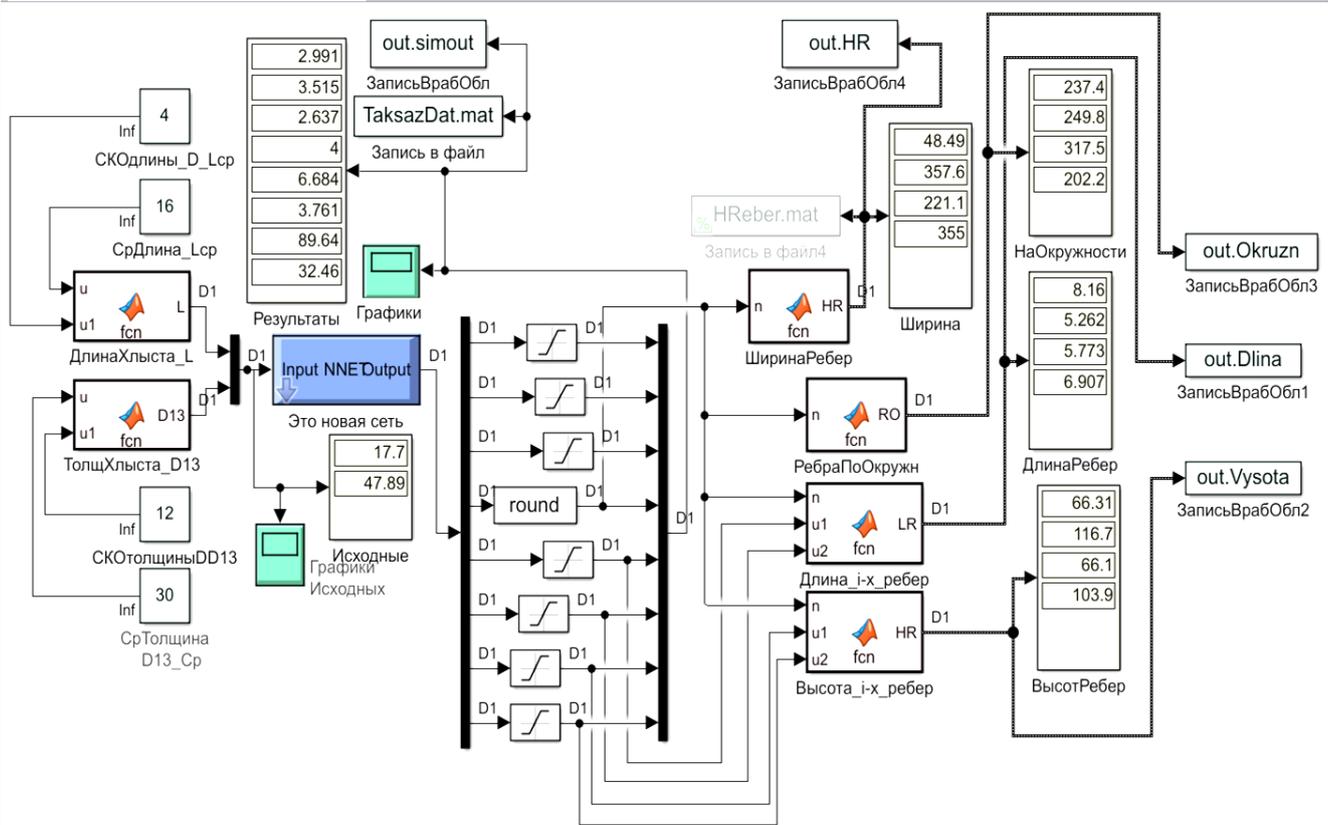


Рис. 6. Обобщенная имитационная модель для моделирования таксационных показателей хлыстов ели

Заключение. В заключении можно отметить следующее.

1. Создана технология с использованием современных компьютерных методов для моделирования таксационных показателей формы хлыстов ели.

2. Проверка по тестовым примерам показала достаточную адекватность технологии и возможность ее использования для цифрового прототипирования лесоматериалов.

3. Обобщенная имитационная модель с нейросетью является универсальной, так как может дополняться новыми данными в обучающую выборку и заново настраиваться, что обеспечивает ей большую точность. При этом не требуется переработка всей компьютерной модели.

4. В дальнейшем эта технология может использоваться для цифрового прототипирования с представлением хлыста в виде 3D-модели.

Литература

- Образовательная компания «Студия Vertex». URL: <https://autocad-lessons.com> (дата обращения: 05.10.2023).
- Ваше окно в мир САПР. URL: <https://isicad.ru> (дата обращения: 05.10.2023).
- Piegat A. Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables. Heidelberg; New York: Physic-Verl, 2001. 760 p.
- Побединский В.В., Ляхов С.В., Салихова М.Н., Иовлев Г.А. Моделирование процессов ТО и Р парка лесозаготовительных машин с учетом производственной эксплуатации // Деревообрабатывающая пром-сть. 2020. № 4. С. 3-11.
- Побединский В.В., Анянова Е.В., Ковалев Р.Н., Иовлев Г.А. Нечеткое моделирование процесса естественной рекультивации нарушенных земель // Resources and Technology. 2022. V. 19, № 1. P. 114-128.
- Побединский В.В., Булдаков С.И., Кручинин И.Н., Ляхов С.В., Анастас Е.С., Карабутова И.А. Интеллектуальная система определения темпа потока при проектировании дорожных покрытий // Деревообрабатывающая пром-сть. 2021. № 4. С. 31-41.
- Хултен Джеф. Разработка интеллектуальных систем / пер. с англ. В.С. Яценкова. М.: ДМК Пресс, 2019. 284 с.
- Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях / пер. с англ. А.И. Осипов. М.: ДМК Пресс, 2018. 312 с.
- MATLAB Release Notes for R20013b. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com>. (дата обращения: 15.10.2023).
- ГОСТ 2140-81. Видимые пороки древесины. Классификация, термины и определения, способы измерения. Введ. 01.01.1982. М.: Стандартинформ, 2006. 122 с.
- Лебедев А.В., Кузьмичев В.В. Проверка двухпараметрических моделей зависимости высоты от диаметра на высоте груди в березовых древостоях // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2020. № 230. С. 100-113.
- Демаков Ю.П., Исаев А.В., Черных В.Л. Эколого-ресурсный потенциал древостоев лесобразующих пород Среднего Поволжья // Вестн. Поволжского гос. технологического ун-та. Сер. Лес. Экология. Природопользование. 2014. № 4 (24). С. 5-20.

13. Curtis R.O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second growth Douglas-fir // *Forest Science*. 1967. № 13. P. 365-375.
14. Pretzsch H. *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
15. Хлюстов В.К., Лебедев А.В. Товарно-денежный потенциал древостоев и оптимизация лесопользования: моногр. Иркутск: Мегап rint, 2017. 328 с.
16. Нагимов З.Я. Ход роста сосновых древостоев разной густоты на Среднем Урале // *Леса России и хозяйство в них*. 2016. № 2 (57). С. 47-54.
17. Ерохина З.В., Хомиджонов М.Б. Зависимость биометрических показателей подроста сосны от условий местопроизрастания // *Лесной и химический комплексы - проблемы и решения: сб. материалов по итогам Всерос. науч.-практической конф. (21 окт. 2022 г.)*. Красноярск, 2023. С. 37-41.
18. Калякина Р.Г., Рябинина З.Н., Тюлебаева С.С., Рябухина М.В. Влияние почвенных условий на строение смешанных древостоев ГЗЛП «Гора Вишневая-Каспийское море» в зоне влияния Оренбургского НГКМ // *Аграрный вестник Приморья*. 2019. № 3 (15). С. 46-50.
19. Осипенко А.Е., Залесов С.В., Белов Л.А., Шубин Д.А. Рост по высоте и диаметру сосновых древостоев в Западно-Сибирском подтаежно-лесостепном районе Алтайского края // *Лесохозяйственная информация*. 2019. № 1. С. 56-66.
20. Хлюстов В.К., Васенёв И.И., Ганихин А.М. Влияние климатических показателей на продуктивность сосновых древостоев // *Природообустройство*. 2022. № 5. С. 121-131.
21. Карпачевский Л.О. *Лес и лесные почвы*. М.: Лесная промышленность, 1981. 264 с.
22. Хлюстов В.К., Ганихин А.М. Экологическая оценка влияния физико-химического состава почв на рост лесных насаждений // *Проблемы региональной экологии*. 2022. № 1. С. 29-36.
23. Краснощеков Ю.Н., Евдокименко Д.М., Чередникова Ю.С., Болонева М.В. Послепожарное функционирование лесных экосистем в Восточном Прибайкалье // *Сибирский экологический журнал*. 2010. Т. 17, № 2. С. 221-230.
24. Calama R., Montero G. Interregional non-linear height-diameter model with random coefficients for Stone pine in Spain // *Canadian Journal of Forest Research*. 2004. № 34. P. 150-163.
25. Минаев В.Н., Леонтьев Л.Л., Ковязин В.Ф. *Таксация леса*. 5-е изд., стер. СПб.: Лань, 2022. 240 с.
26. Нагимов З.Я., Зубова С.С., Сычугова О.В., Орехова О.Н., Григорьев А.А., Сальникова И.С., Постникова С.С. Таксация отдельного дерева. Екатеринбург: УГЛТУ, 2020. 160 с.
27. Алесенков Ю.М., Андреев Г.В., Иванчиков С.В., Белов Л.А., Черных А.И. Влияние ветровала на соотношение диаметров и высот в длительно-производном березняке хвощево-вейниковом // *Леса России и хозяйство в них*. 2019. № 3 (70). С. 48-53.
28. Ogana F.N., Corral-Rivas S., Gorgoso-Varela J.J. Nonlinear mixed-effect height-diameter model for *Pinus pinaster* AIT. and *Pinus radiata* D. DON. *Cerne*. 2020. V. 26, № 1. P. 150-161.
29. Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry). 2021. № 4. P. 31-41.
7. Development of intelligent systems / per. s angl. V.S. YAcenkova. M.: DMK Press, 2019. 284 p.
8. Dzhons M.T. Programming artificial intelligence in applications / per. s angl. A.I. Osipov. M.: DMK Press, 2018. 312 p.
9. MATLAB Release Notes for R20013b. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com>. (data obrashcheniya: 15.10.2023).
10. GOST 2140-81. Visible defects of wood. Classification, terms and definitions, methods of measurement. Vved. 01.01.1982. M.: Standartinform, 2006. 122 p.
11. Lebedev A.V., Kuz'michev V.V. Verification of two-parameter models of height dependence on diameter at chest height in birch stands // *Izvestia SPbLTA*. 2020. № 230. P. 100-113.
12. Demakov YU.P., Isaev A.V., CHernyh V.L. Ecological and resource potential of stands of forest-forming species of the Middle Volga region // *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Forest. Ecology. Nature management*. 2014. № 4 (24). P. 5-20.
13. Curtis R.O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second growth Douglas-fir // *Forest Science*. 1967. № 13. P. 365-375.
14. Pretzsch H. *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
15. Hlyustov V.K., Lebedev A.V. Commodity-monetary potential of stands and optimization of forest management: monogr. Irkutsk: Megaprint, 2017. 328 p.
16. Nagimov Z.YA. The course of growth of pine stands of different density in the Middle Urals // *The Woods of Russia and economy in them*. 2016. № 2 (57). P. 47-54.
17. Erohina Z.V., Homidzhonov M.B. Dependence of biometric indicators of pine undergrowth from the conditions of the place of growth // *Lesnoj i himicheskij komplekсы - problemy i resheniya: sb. materialov po itogam Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (21 okt. 2022 g.)*. Krasnoyarsk, 2023. P. 37-41.
18. Kalyakina R.G., Ryabinina Z.N., Tyulebaeva S.S., Ryabuhina M.V. Influence of soil conditions on the structure of mixed stands of the GZLP "Mount Vishnevaya-Caspian Sea" in the zone of influence of the Orenburg NGCM // *Agrarian bulletin of Primorye*. 2019. № 3 (15). P. 46-50.
19. Osipenko A.E., Zalesov S.V., Belov L.A., SHubin D.A. Growth in height and diameter of pine stands in the West Siberian subtaiga-forest-steppe region of the Altai Territory // *Forestry Information*. 2019. № 1. P. 56-66.
20. Hlyustov V.K., Vasenyov I.I., Ganihin A.M. The influence of climatic indicators on the productivity of pine stands // *Prirodoobustrojstvo*. 2022. № 5. P. 121-131.
21. Karpachevskij L.O. *Forest and forest soils*. M.: Lesnaya promst', 1981. 264 p.
22. Hlyustov V.K., Ganihin A.M. Ecological assessment of the influence of the physico-chemical composition of soils on the growth of forest plantations // *Regional Environmental Issues*. 2022. № 1. P. 29-36.
23. Krasnoshchekov YU.N., Evdokimenko D.M., CHerednikova YU.S., Boloneva M.V. Post-fire functioning of forest ecosystems in the Eastern Baikal region // *Contemporary Problems of Ecology*. 2010. V. 17, № 2. P. 221-230.
24. Calama R., Montero G. Interregional non-linear height-diameter model with random coefficients for Stone pine in Spain // *Canadian Journal of Forest Research*. 2004. № 34. P. 150-163.
25. Minaev V.N., Leont'ev L.L., Kovyazin V.F. *Forest taxation*. 5-е изд., стер. СПб.: Лань, 2022. 240 p.
26. Nagimov Z.YA., Zubova S.S., Sychugova O.V., Orekhova O.N., Grigor'ev A.A. Sal'nikova I.S., Postnikova S.S. Taxation of a separate tree. Ekaterinburg: UGLTU, 2020. 160 p.
27. Alesenkov YU.M., Andreev G.V., Ivanчиков S.V., Belov L.A., CHernyh A.I. The influence of wind on the ratio of diameters and heights in the long-term derivative of the horse-tail-veinikovy birch // *The Woods of Russia and economy in them*. 2019. № 3 (70). P. 48-53.
28. Ogana F.N., Corral-Rivas S., Gorgoso-Varela J.J. Nonlinear mixed-effect height-diameter model for *Pinus pinaster* AIT. and *Pinus radiata* D. DON. *Cerne*. 2020. V. 26, № 1. P. 150-161.

References

1. Educational company "Vertex Studio". URL: <https://autocad-lessons.com> (data obrashcheniya: 05.10.2023).
2. Your window into the world of CAD. URL: <https://isicad.ru> (data obrashcheniya: 05.10.2023).
3. Piegat A. *Fuzzy Modeling and Control: with 96 tables*. Heidelberg; New York: Physic-Verl, 2001. 760 p.
4. Pobedinskij V.V., Lyahov S.V., Salihova M.N., Iovlev G.A. Modeling of the processes of maintenance and repair of logging machines taking into account industrial operation // *Derevoobrabativaushaya promishlennost' (Woodworking industry)*. 2020. № 4. P. 3-11.
5. Pobedinskij V.V., Anyanova E.V., Kovalev R.N., Iovlev G.A. Fuzzy modeling of the process of natural reclamation of disturbed lands // *Resources and Technology*. 2022. V. 19, № 1. P. 114-128.
6. Pobedinskij V.V., Buldakov S.I., Kruchinin I.N., Lyahov S.V., Anastas E.S., Karabutova I.A. An intellectual system for determining the flow rate in the design of road surfaces //