

Модель нейронной сети оценки показателей качества бумажной промышленности

Neural network model for assessing the quality indicators of the paper industry

doi 10.26310/2071-3010.2020.266.12.002



И. В. Рудакова,

к. т. н., доцент, кафедра автоматизации процессов химической промышленности, факультет информационных технологий и управления, Санкт-Петербургский государственный технологический институт
✉ riv-lilu@yandex.ru

I. V. Rudakova,

санд. сс. (технология), associate professor, processes automation in chemical industry, information technology and control, Saint-Petersburg state institute of technology



А. А. Пешехонов,

к. т. н., доцент, кафедра автоматизации процессов химической промышленности, факультет информационных технологий и управления, Санкт-Петербургский государственный технологический институт
✉ alanpeshkhonov@mail.ru

A. A. Peshkhonov,

санд. сс. (технология), associate professor, processes automation in chemical industry, information technology and control, Saint-Petersburg state institute of technology



А. В. Черникова,

к. т. н., доцент, Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
✉ a-v-chernikova@mail.ru

A. V. Chernikova,

санд. сс. (технология), associate professor, Institute of industrial management, economics and trade, Peter the Great St. Petersburg polytechnic university



С. Н. Кузьмина,

д. э. н., профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
✉ Kuzmina2003@bk.ru

S. N. Kuzmina,

doctor of sc. (ec.), professor, Saint-Petersburg electrotechnical university

Исследования зависимости качества бумажного полотна от условий производства и свойств сырья дают значительный статистический разброс, вследствие чего невозможно точно прогнозировать результат. Этот факт стал предпосылкой применения технологии нейросетевого моделирования при разработке интеллектуальной системы мониторинга качества бумажного полотна. Рассмотрена методика определения оценок неоднородности структуры бумажного полотна на завершающей стадии его производства. Предложено расширить классификацию образцов готовой продукции посредством использования нейронечеткой интерполяции лингвистических значений таких показателей, что позволит повысить эффективность производственного процесса.

Studies of the dependence of the quality of the paper web on the production conditions and properties of raw materials give a significant statistical spread, as a result of which it is impossible to accurately predict the result. This fact became a prerequisite for the use of neural network modeling technology in the development of an intelligent system for monitoring the quality of the paper web. The methodology for determining the estimates of the heterogeneity of the structure of the paper web at the final stage of its production is considered. It is proposed to expand the classification of finished product samples through the use of neurofuzzy interpolation of the linguistic values of such indicators, which will improve the efficiency of the production process.

Ключевые слова: производство бумаги, оценка качества, оценка неоднородности структуры, нейросетевая модель, нейросетевой классификатор.

Keywords: paper production, quality assessment, structural heterogeneity assessment, neural network model, neural network classifier.

Введение

Процесс формования и обезвоживания бумажного полотна является одним из важнейших в производстве качественной бумаги. Основная задача процесса — получение по возможности однородной структуры бумажного полотна. Исследования в данной области проводились различными авторами и научными школами. Рассмотрены подходы к решению задачи повышения точности и стабильности технологического процесса производства бумаги на стадиях подготовки и формования, а также получения экстремальной зависимости неравномерности просвета бумаги от скорости напуска массы на сетку [1]. Авторами проведено исследование, направленное на получение физико-химических и физико-механических характеристик сырья, влияющих на повышение способности к связеобразованию волокон и стабилизации процесса формования и обезвоживания бумажного полотна [2]. Представлены результаты оценки равномерности

просвета с использованием различных специальных технических средств контроля [3] и результаты исследования системы для визуализации и анализа однородности структуры бумажного листа [4]. Ряд работ посвящен вопросам применения технологий нейросетевого моделирования, в том числе систем диагностики [5], систем поддержки принятия решений [6], систем прогнозирования [7], систем оперативно-диспетчерского управления [8].

О проблемах в деятельности промышленных предприятий в сфере производства бумаги и результатах по их устранению имеется также достаточно много исследований в профессиональной литературе. Предложено решение реальных проблем в бумажной промышленности: математические подходы, опыт и проблемы [9], проведена типология проблем резки и упаковки [10], представлена оптимизация плана раскроя в бумажной промышленности [11], а также интегрированное решение задач назначения, последовательности и резки в планировании производства бумаги [12], оптимизация

комплексной проблемы определения размера партии и сокращения запасов в бумажной промышленности [13], интеграция двумерного раскроя и задачи определения размера партии [14]. Так, например, результаты исследования [15] представляет новый подход к использованию методологии Six Sigma DMAIC (определение, измерение, анализ, улучшение, контроль). Этот подход объединяет различные инструменты и методы в единую структуру, которая состоит из пяти этапов. Так, например, исследование [16], посвященное поиску методов промышленного инжиниринга, которые оказывают существенное влияние на общую эффективность бизнеса, позволило определить, распространяется ли воздействие методов промышленного проектирования на все или только на отдельные отрасли. Представлен алгоритм для задач с экстремальными ограничениями [17], результаты исследования о проблемах, методах моделирования, методах решения [18]. О проблемах влияния цифровизации на развитие современной метрологии [19] и особенностях применении суперкомпьютерных технологий для моделирования социально-экономических систем в целом [20].

В то же время важнейшие задачи, касающиеся качества производства бумажной продукции, лежат в плоскости именно показателей качества, определяемых нормативной документацией.

Оценка неоднородности структуры, как показателя качества полотна, носит субъективный характер, так как часто определяется «на просвет». Согласно ГОСТ Р 53636-2009, «просвет: показатель, характеризующий равномерность распределения составляющих компонентов в бумаге в виде участков неодинаковой непрозрачности, видимых на листе бумаги в проходящем свете» [21]. ГОСТом не определены численные характеристики просвета. «Плохой» просвет бумаги технологически обусловлен неравномерным распределением бумажной массы по площади листа, которое является следствием хлопьеобразования (флоккуляции) волокон в процессе формования. Бумага с неудовлетворительным просветом обычно неравномерна по толщине и отличается невысокими эстетическими показателями, плохими печатными свойствами и повышенной склонностью к короблению поверхности [3].

Для определения просвета необходимо ярко осветить бумажный образец, после чего зафиксировать его изображение в оцифрованном виде. Для численной оценки используются такие критерии, установленные, например, в ОСТ 13-299-87 [22]:

- индекс формования — отношение высоты к ширине гистограммы точек (ордината) различной яркости (абсцисса);
- неоднородность просвета — среднее квадратическое отклонение яркости точек;
- светопропускание — отношение средней яркости к яркости источника света;
- неоднородность по направлению отражает зависимость величины светового потока от координаты вдоль полотна. Вычисляется в продольном и поперечном направлении;
- неравномерность распределения массы — сумма избытка (флоккулы) и недостатка (промоины) массы в образце.

Еще один термин, принятый для характеристики неоднородности структуры бумажного полотна — облачность, которая оценивается по двум показателям, а именно по интенсивности и масштабу. Интенсивность характеризуется величиной изменения локальной массы бумаги, а масштаб — размерами зон повышенной (флоккулы) и пониженной (промоины) массы. Флоккулы содержат в основном длинные волокна, а в промоинах сосредоточена плотно спрессованная «мелочь». Неравномерное по плотности заполнение бумажного листа является причиной появления вторичных дефектов, например, низкой механической прочности, пониженной воздухопроницаемости, низкой впитывающей способности, дефектов печати («пятнистость»), пониженного показателя белизны [1], неравномерного окрашивания поверхности бумаги. До сих пор не существует ГОСТа на оценку облачности, как показателя качества бумажного полотна, что свидетельствует о сложности объективного описания и оцифровки данного показателя.

Методы и статистика

Анализ ряда тематических работ [1-3] показал, что облачность зависит как от выбранных технологических режимов на различных стадиях процесса производства бумаги (скорость бумагоделательной машины, параметры режима сушки, наклон гидропланок — обезвоживание, степень помола бумажной массы и т. д.), так и от параметров исходного сырья (композиция бумажной массы — хвоя, лиственные, древесная масса, оборотный брак, вид древесного полуфабриката; наличие флоккулирующих и дефлоккулирующих добавок).

Интенсификация таких исследований определяется внедрением в промышленность технических средств контроля неоднородности структуры бумажного полотна, то есть переходом от субъективной оценки облачности к возможности получения объективных количественных оценок этого показателя. Различные фирмы проводят анализ просвета и облачности, основываясь на ряде специфических оценок, таких как: индекс формования, удельный периметр, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации, средний размер неоднородности, корреляционная функция.

Взаимосвязь структуры и определяющих ее технологических параметров с получаемым качеством была установлена в ходе нескольких исследований. Так в работе [2] была установлена связь качества, во-первых, с количеством волокон разной длины — более качественные образцы имеют очень высокое количественное содержание мелких волокон (до 1 миллиметра) — около 80%; во-вторых, со степенью помола (СП) и состава пород — лучшее качество у образца с большей степенью помола и содержанием лиственных пород — можем заметить, что это также способствует получению более мелких волокон.

По просвету можно охарактеризовать структуру готового продукта — это подтверждается в работе [3], где было оценено влияние таких параметров, как степень помола (СП), содержание наполнителя, про-

Связь показателей качества бумаги

Показатель	Расчетное выражение для показателя	Функциональная связь
Светопропускание	$T = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n I_0},$ где I_0 – яркость исходного света; I_i – яркость света прошедшего через точку i ; n – число точек в образце	
Неоднородность просвета	$\sigma = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (I_i - I_c)^2 \right)^{1/2},$ $I_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i$	
Средняя геометрическая неоднородность	$d_c = (I_{шп} - I_{пр})/2$, где $I_{шп}$, $I_{пр}$ – средняя длина неоднородностей в продольном и поперечном сечении	
Неравномерность распределения массы	$W = M_{из}/M_{нед}$, где $M_{из}$ – суммарный объем избытка массы; $M_{нед}$ – суммарный объем недостатка массы	

клеивающего вещества, на показатели качества просвета картона и бумажного полотна. Связь между СП (в градусах Шоппера–Риглера) и рядом основных показателей качества макроструктуры бумаги, выраженных в относительных единицах, приведена в табл. 1.

Как указывается в работах по статистической оценке качественных характеристик бумажного полотна и не только, вид корреляционных зависимостей для различного типа рулонной продукции не позволяет однозначно выполнить классификацию от неудовлетворительного просвета к хорошему, ранжируя показатели качества от минимума к максимуму. Распределение волокон макроструктуры бумажного полотна во многом определяется условиями ведения процесса и характеристиками исходного сырья. Большинство стандартизованных показателей качества определяются лабораторными методами и не пригодны для онлайн-оценки бумажного полотна, в отличие по просвету, по которому можно охарактеризовать равномерность структуры и, соответственно, качество полотна. Принимая во внимание оснащение современных бумагоделательных машин системами контроля изображения готового полотна на просвет, например, системой Cognex, была сформирована задача разработки классификатора на основе обобщения статистических данных, поскольку в состав перечня алгоритмов обработки статистических данных в Cognex не входит классификация просвета бумаги.

Для создания системы классификации качества бумажного полотна необходимо иметь наборы образцов, ранжированных в зависимости от степени схожести с желаемой макроструктурой бумаги. В качестве ис-

ходных данных использованы образцы бумаги, каждый из которых подвергался просвечиванию с постоянной интенсивностью, далее сняты изображения с таким разрешением, чтобы были зафиксированы все особенности макроструктуры. Система видеоконтроля при расчете гистограмм распределения яркости (интенсивности) использует серую шкалу цвета (глубина 8 бит на пиксель), которая передает 256 оттенков серого (0 – черный цвет, 255 – белый цвет). Весь диапазон яркости 0–255 делится на 16 секций: 4 секции светлых пикселей, 8 секций серых пикселей и 4 секции темных пикселей, в результате выдается процентное содержание пикселей в каждой секции.

Для количественной оценки просвета бумаги использованы следующие показатели, модифицированные по отношению к стандартному варианту показателей:

1. Коэффициент вариации $VAR = \sigma/M$, где σ – среднее квадратическое отклонение яркости; M – математическое ожидание яркости.
2. Пирсоновская мера асимметрии одномодального распределения $AS = (M - \text{mod})/\sigma$, где mod – мода (максимум плотности распределения яркости). Этот показатель косвенно отражает избыток или недостаток флоккул (скопления крупных волокон) и промоин (скопление мелочи).
3. Относительные площади промоин и флоккул. По изображению с 8-битным разрешением устанавливается яркость промоин (примерно 255) или флоккул (меньше 128), после чего оценивается количество пикселей заданного уровня яркости на гистограмме.

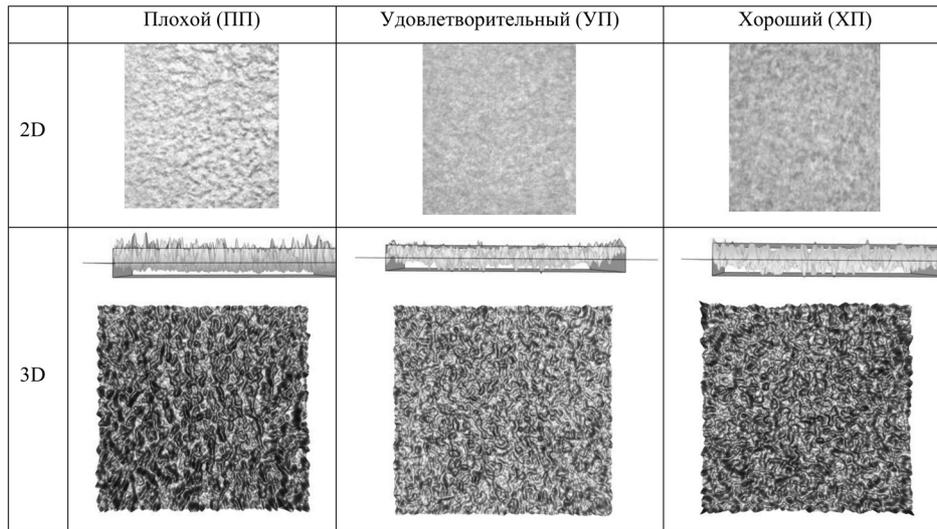


Рис. 1. 2D- и 3D-изображения образцов бумаги с качественными характеристиками ХП и ПП

Тогда относительная площадь флоккул

$$SF=(CF \cdot 100)/C_0,$$

относительная площадь промоин

$$SP=(CP \cdot 100)/C_0,$$

где SF и SP – относительная площадь флоккул и промоин; CF, CP – количество пикселей флоккул или промоин; C₀ – общее число пикселей в изображении.

Анализ образцов бумаги, полученных в качестве базовых, выполнен экспертами и носит субъективный характер. Эксперты присвоили образцам категории по просвету «хороший» (ХП), «удовлетворительный» (УП), «плохой» (ПП). В качестве проверки на достоверность экспертных оценок получено 3D изображение типовых для каждого ранга образцов в защищенном свидетельством о государственной регистрации ЭВМ 2013619551 программном обеспечении PaperDensity. На рис. 1 приведены результаты представления бумаги «хорошего» (ХП), «удовлетворительного» (УП) и «плохого» (ПП) просвета.

На изображениях ПП явно выделяются области промоин и выступают участки с флоккулами, чего не наблюдается на образце ХП. На образце с удовлетворительным просветом есть области распределенных промоин, и эта особенность бумажного полотна видна в основном на расчетных показателях яркости. Отсутствие явно выраженной корреляции между количественными значениями показателей и результатами лабораторного анализа, выполненного экспертами, подводит решаемую задачу к подходам, связанным с распознаванием образов. На рис. 2 представлена графическая интерпретация статистических данных, описывающих 24 образца бумаги, относящихся к трем различным категориям по просвету. Если проанализировать распределение значений выбранных в качестве основных четырех показателей качества и сопоставить полученные массивы с экспертными оценками, то можно увидеть что отклонения отдельных показателей (например, AS), компенсируемые равномерным распределением макроструктуры, позволяют отнести образец к классу ХП.

На сегодняшний момент одним из перспективных направлений в разработке модели, предназначенной для классификации конкретного образца, при ис-

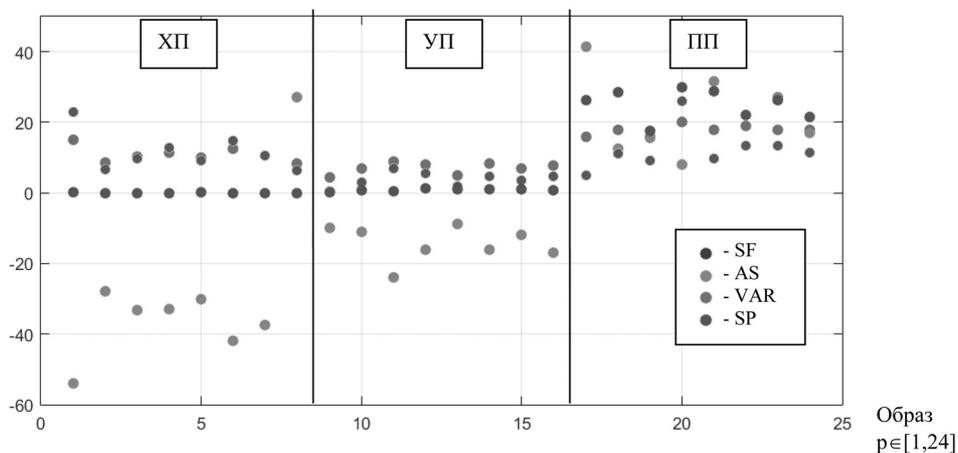


Рис. 2. Графическая интерпретация результатов экспертных оценок образцов бумажного полотна

пользовании в качестве основы пополняемого массива статистических данных являются нейросетевые технологии. Разработка нейросетевой модели, предназначенной для ранжирования образов, заданных на множестве четырех статистических показателей, базируется на типовых топологиях [5], сформированных, в частности, для решения задач классификации и распознавания образов в условиях неполного изображения образа [23]:

- многослойная сеть прямого распространения, обучающаяся по схеме backpropagation (BPN),
- радиально базисная сеть (Radial Basis Function – RBF),
- вероятностная нейронная сеть (Probabilistic Neural Networks – PNN),
- нейросетевая модель нечеткого композиционного вывода.

Если использование структуры сети BPN требует выбора числа слоев, назначения количества нейронов в слое, а также исследование работы сети с различными видами функций активации, то топология сетей RBF и PNN формируется на основе размерности и корреляции данных в обучающем массиве. Однако, в данной задаче надо принять во внимание, что по мере накопления образцов, обучающий массив будет расширяться, и в ходе переобучения будет меняться число нейронов сети. При этом топологии RBF и PNN будут подстраиваться под расширение массива в ходе обучения. Из табл. 1 видно, что состав показателей качества рулонной продукции может быть различным, причем нет четкого распределения диапазонов варьирования показателей с тем, чтобы соотнести их с понятием ПП,

УП или ХП. Кроме понятия просвета необходимо принять во внимание, что на поверхности рулонной продукции периодически возникают дефекты (складки, заломы, разрывы и т. д.), при возникновении которых необходимо выделить участок полотна с тем, чтобы вырезать бракованную часть. Для каждого вида дефекта невозможно составить типовое изображение, поэтому, с целью первоначального распознавания дефекта перед выполнением процедуры классификации продукции по просвету, целесообразно использовать другую нейросетевую модель.

Классификация возможных дефектов, например, пятно или дыра, создает предпосылки использования лингвистического представления расчетных показателей качества. Сочетание большого положительного значения AS, при повышенном значении показателя SP, с повышенным значением средней геометрической неоднородности в продольном сечении может свидетельствовать о появлении залома или пятна. Например, если опираться на ранее выделенные признаки, то четкие значения показателей VAR, SP, SF после фазификации описываются совокупностью функций принадлежности относительно трех лингвистических значений (термов): «малый», «средний», «большой» или μ_M , μ_C , μ_B , а мера асимметрии AS термами: «отрицательный», «нулевой», «положительный» или μ_O , μ_H , μ_P . Накопление образцов бумажного полотна с четкими проявлениями дефектов идет неравномерно, и по мере набора материала требуется корректировать функции принадлежности термов лингвистических представлений оценок. Перспективным подходом в этом случае является использование гибридной системы нечеткого вывода и нейросетевого моделирования

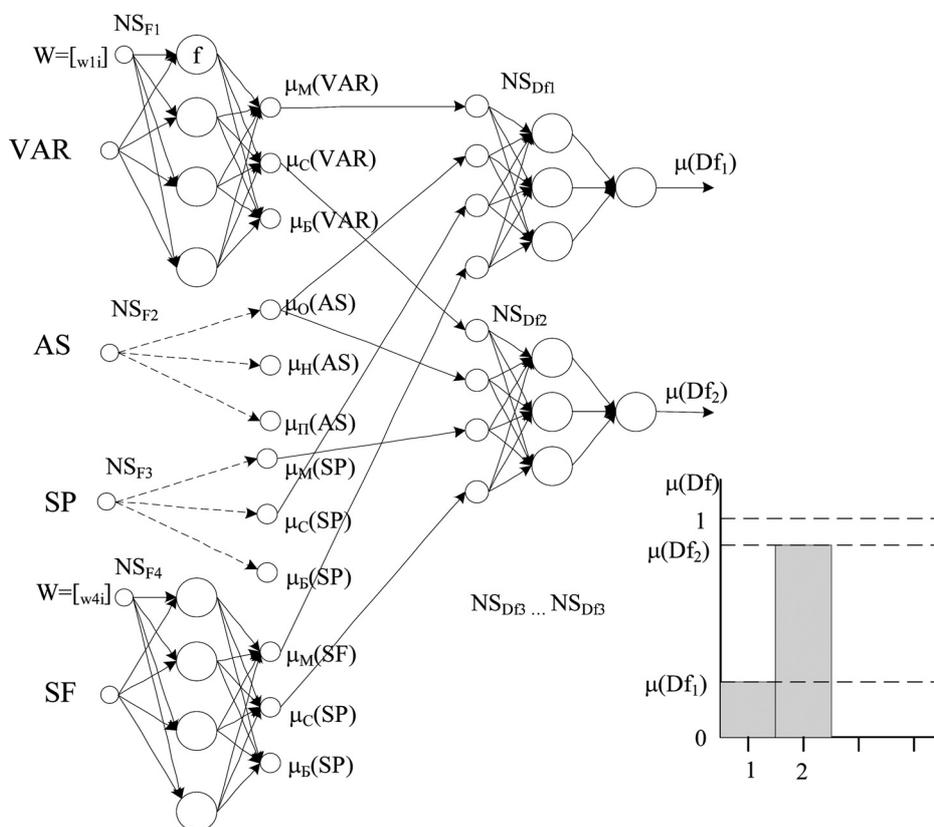


Рис. 3. Модульная структура нейросетевого классификатора дефектов бумажного полотна

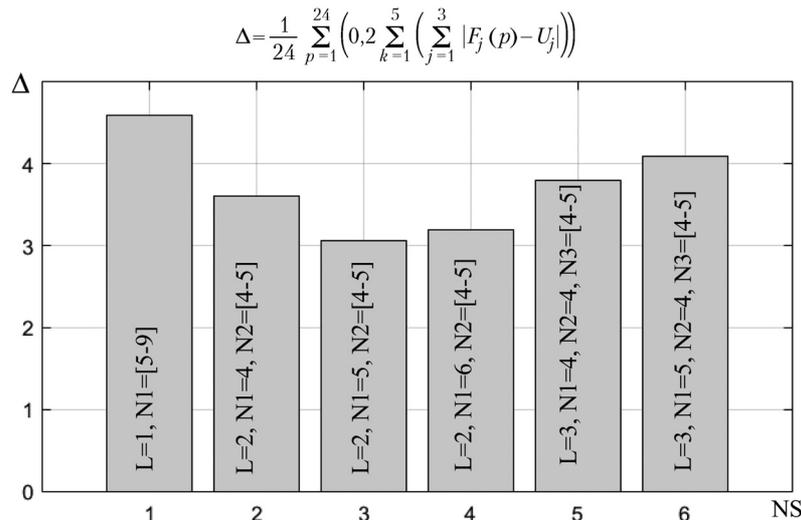


Рис. 4. Анализ результатов подбора структуры сети BPN

[7]. Структура такой сети применительно к задаче распознавания дефектов приведена на рис. 3.

Чтобы обеспечить гибкость нейросетевой модели и расширение банка распознаваемых дефектов по мере накопления статистических данных, выбирается система, состоящая из двух уровней автономных нейросетевых модулей. Операция фаззификации реализуется нейронной сетью на базе однослойного персептрона NS_{F1} - NS_{F4} , что позволяет при необходимости автономно подстраивать параметры функции принадлежности. Для представления колоколообразной функции принадлежности предлагается использовать типовую структуру искусственного нейрона с сигмоидальной функцией преобразования

$$f=1/(1+\exp(-g(x+w))),$$

где g – весовой коэффициент суммарного сигнала на входе функции преобразования, w – весовой коэффициент для смещения, x – входное четкое значение показателя.

Реализация операции фаззификации на типовых структурах нейронов не накладывает серьезных ограничений на выбор среды проектирования такой системы. Кроме того, из-за перехода к нечеткому представлению нет необходимости выполнять предварительное нормирование исходных данных. Таким образом, пространство описывающих изображение переменных расширяется до 12 посредством перевода их в функции принадлежности лингвистических значений (термов) показателей.

Второй уровень нейросетевых моделей связан с выявлением степени схожести наблюдаемого образа с заложенными в модель описаниями дефектов. В качестве топологии локальных сетей NS_{Dfj} выбрана классическая сеть прямого распространения с одним скрытым слоем, с нелинейными нейронами (сигмоидальная функция преобразования) на скрытом слое и с линейной функцией с ограничениями на выходном слое. Таким образом, объединяя термы показателей, присущих определенному дефекту Df_j , формируется нейросетевой модуль NS_{Dfj} расчета степени принад-

лежности анализируемого изображения к данному типу дефекта $\mu(Df_j)$.

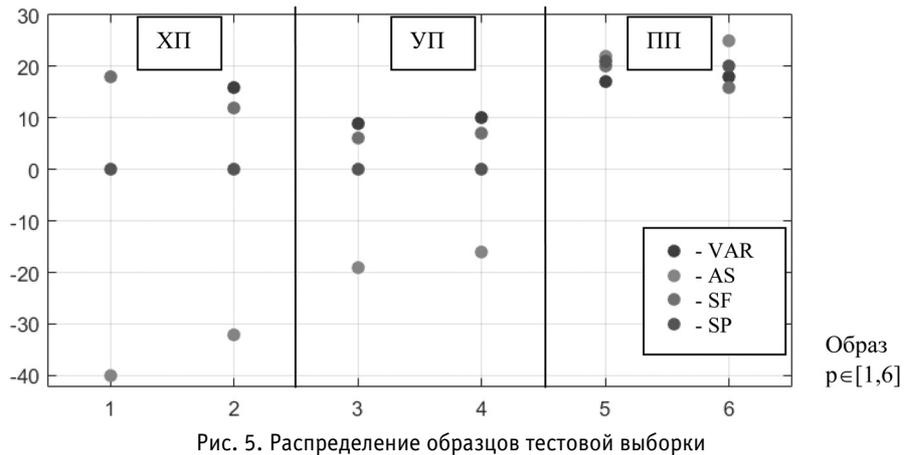
Результаты работы классификатора представлены на рис. 3 в виде гистограммы. Если ни один из выходов классификатора не показал превышение порога обнаружения дефекта $\mu(Df_j) > \mu_{\max}$, то далее выполняется операция классификации наблюдаемого фрагмента полотна по просвету, в противном случае наблюдаемый участок фиксируется, как брак и подлежит удалению на этапе работы продольно-резательного станка.

Результаты

Моделирование выполнено в среде MatLab с использованием процедуры nntool. Для обучающего массива размерностью 24×4 (количественные показатели просвета), представленного на рис. 2, сформирован массив ожидаемых выходов размерностью 24×3 . Каждый выход принимает значение 0/1 в зависимости от соответствия или несоответствия конкретного образа обучающего массива одному из трех уровней качества бумаги: ПП, УП, ХП. Для выявления возможности применения перечисленных в п. 2 топологий были разработаны модели нейросетевого классификатора просвета на основе трех структур BPN, RBF и PNN сетей.

Разработка нейросетевой модели на основе BPN включала варьирование числа слоев L и числа нейронов N на скрытых слоях при использовании сигмоидальной функции активации. При разработке нейронной сети рассматривались структуры, которые при обучении по алгоритму Левенберга–Марквардта давали минимум ошибки обучения с относительно небольшим числом эпох. Гистограмма средних значений ошибок по всем выходам сети при подаче на вход обучающего массива при варьировании L и N приведена на рис. 4. Каждая структура переобучалась 5 раз до выхода на минимум ошибки обучения.

По обобщенным результатам видно, что распределение данных обучающего массива лучше всего аппроксимируется моделью с двумя скрытыми слоями и числом нейронов на первом равном 5. Ограниченная



размерность обучающего массива резко сказывается на ухудшении результатов при увеличении числа скрытых слоев. Для тестирования выбранных топологий использована новая тестовая выборка (рис. 5) из 6 образцов, включающих все три категории бумаги.

Классификатор на основе сети BPN, как показано на рис. 6, дает сбои как на распознавании тестовых образов, так и в обучающем массиве, чаще всего в категориях УП и ПП. Переход в сетях RBF и PNN на разбиение пространства переменных гиперсферами позволяет выполнить четкую классификацию на обучающем массиве, но для сети RBF недостаточно полно

описано пространство состояний, что проявляется в значительных ошибках на тестировании (рис. 6).

Выбор класса по степени близости через плотность распределения функции Гаусса, реализуемый в сети PNN, сглаживает ситуацию ограниченного набора данных и позволяет четко распознать как образы обучающего массива, так и тестовые образы (рис. 6).

Заключение

Оценка технических возможностей современных систем контроля качества бумаги показывает, что для внедрения систем машинного зрения на финальной

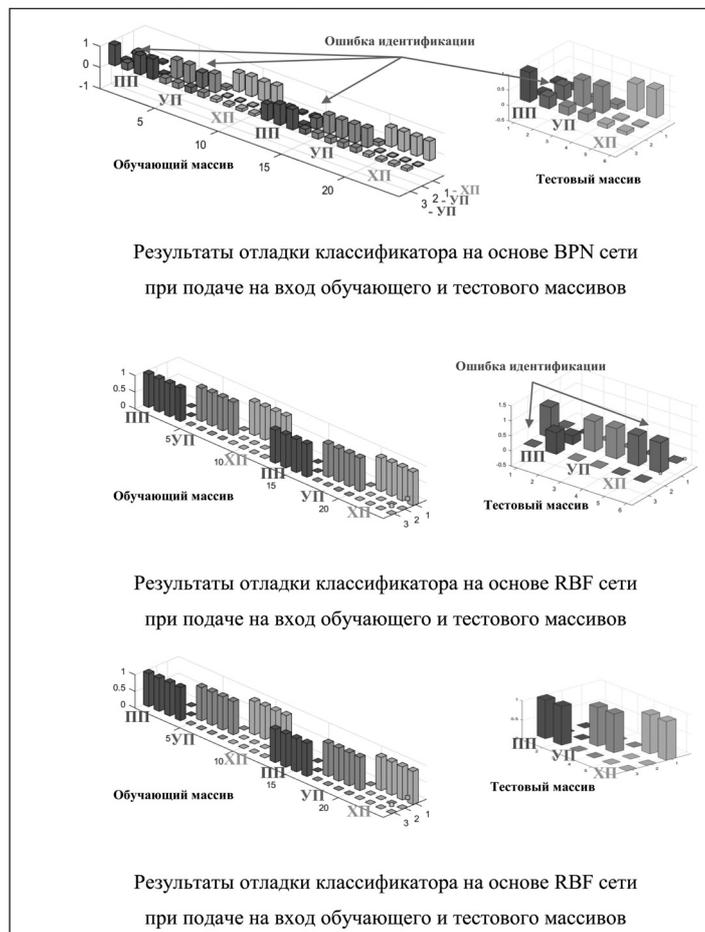


Рис. 6. Варианты результатов отладки классификатора

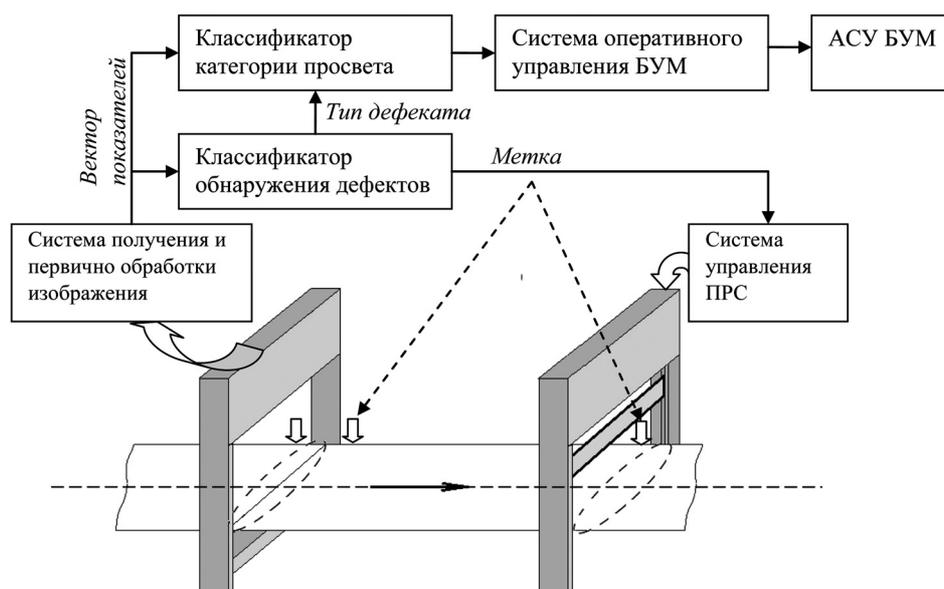


Рис. 7. Структура системы оперативного управления процессом производства бумаги

стадии производства рулонной продукции существуют не только экономические предпосылки. Появляются системы, позволяющие решать задачу считывания не только в офлайн-режиме, но и в онлайн-изображении полосы полотна на просвет. Использование расчетных обобщающих показателей, как например, AS, VAR, SP, SF, снижают размерность задачи и сокращают время выполнения алгоритма идентификации на текущем временном шаге. Применение эмпирических экспертных сведений позволяет увеличить диапазон идентификации качества продукции за счет выявления на полотне часто встречающихся дефектных зон. Как показали результаты исследований, базовый классификатор по уровню просвета, позволяющий определить качество получаемой продукции, целесообразно реализовать на вероятностной нейронной сети PNN, так как в рамках решаемой задачи нет гарантии, что обучающий массив будет равномерно покрывать все пространства по каждой из категорий ХП, УП и ПП.

Направления дальнейших исследований

Возможное практическое применение разрабатываемого классификатора не ограничивается только контролем качества [9]. На данный момент разработаны структуры нейросетевых классификаторов бумажного полотна не только для контроля «на просвет», но для ряда других специфических дефектов бумажного полотна. Результаты автоматического анализа качества могут использоваться для формирования задания системе управления продольно-резательным станком (ПРС) с целью обеспечить удаление из готовой продукции заведомо дефектного участка [5], а также для организации обратной связи по основному показателю качества продукции и внесения коррекции в алгоритм управления бумагоделательной машины (БУМ) с тем,

чтобы предотвратить дальнейший выпуск низкокачественной продукции. Таким образом, в случае выявления устойчивых отклонений качества бумажного полотна и идентификации их возможной причины, механизм вывода системы оперативного управления в режиме онлайн выполняет коррекцию режимных параметров для АСУ БУМ. Структурная схема такой системы приведена на рис. 7.

В данной работе предложена общая концепция второй части системы, а именно распознавания дефектов на бумажном полотне. Сложности в практической реализации связаны с трудоемкостью набора для формирования обучающего массива достаточного количества изображений (образов) с предварительной экспертной оценкой. Проявление одного и того же типа дефекта может значительно отличаться, поэтому база основных показателей расширяется. Кроме того, необходимо оценить вероятность возникновения ложного обнаружения из-за случайного попадания в зону снятия видеокладов постороннего объекта. Разноплановые научно-исследовательские работы, связанные с выявлением взаимного влияния режимных параметров бумагоделательной машины и вариацией показателей качества готовой продукции, не дают четких математических моделей, поэтому для организации цепи обратной связи целесообразно развивать второе направление исследований, касающееся разработки алгоритмов расчета корректирующих воздействий.

* * *

Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ в рамках выполнения исследований по проекту № 19-010-00968 «Методология и инструментарий цифровизации управления качеством системы образования и обеспечения устойчивого развития экономических агентов».

Список использованных источников

1. М. С. Ревунов. Совершенствование системы стабилизации параметров бумажного потока с использованием алгоритма взаимной корреляции//Контроль мониторинга измерений. Контроль. 2018. № 4. С. 24-31.
2. И. И. Осовская, В. С. Антонова. Влияние разрушения поверхности на гидрофильность и способность соединения волокон целлюлозы//Химия растительного сырья. 2020. № 1. С. 315-320.

3. С. М. Герасюта, А. С. Смолин, Е. И. Иванова, В. С. Каневская. Исследование коэффициента вариации и среднего размера неоднородности для различных типов бумаги на цанговом анализаторе АП-2//Известия Санкт-Петербургской лесной академии. 2016. № 217. С. 238-247.
4. В. В. Абрамова, А. В. Гурьев. Оценка однородности макроструктуры, формирующей копируемую бумагу//Новости высшего образования. Лесной журнал, 2017, № 4. С. 172-186.
5. Д. А. Маношин. Программирование искусственного интеллекта//Коллоквиум-журнал. 2019. № 12 (36).
6. Y. Zhou, T. Murata. Fuzzy-timing Petri net model for distributed mul-timedia synchronization//Proc. of the 1998 IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 11-14. Lolla, California, 1998. P. 244-249.
7. X. Koutsoukos, P. J. Antsaklis, J. A. Stiver, M. D. Lemmon. Supervisory control of hybrid systems//Proc. of IEE. 2000. 88. № 5. P. 1026-1049.
8. Y. Qian, X. X. Li, Y. R. Jiang. An expert system for real-time fault diagnosis of complex chemical processes//Expert Systems with Applications Vol. 24. Issue 4. May 2003. P. 425-432.
9. J. Kallrath, S. Rebennack, J. Kallrath, R. Kusche. Solving real-world cutting stock-problems in the paper industry: Mathematical approaches, experience and challenges//European Journal of Operational Research. 2014. Vol. 238. Issue 1. P. 374-389.
10. H. Dyckhoff. A typology of cutting and packing problems//European Journal of Operational Research. 990. № 44. P. 145-159.
11. I. Harjunkoski. Qualitaetsbasierte Schnittplanoptimierung in der Papierindustrie//Automatisierungstechnik. 2008. № 2. P. 31-44.
12. M. H. Correia, J. F. Oliveira, J. S. Ferreira. Integrated resolution of assignment, sequencing and cutting problems in paper production planning//International Journal of Production Research. 2012. 50 (18). P. 5195-5212.
13. S. C. Poltroniere, S. A. Araujo, K. C. Poldi. Optimization of an Integrated Lot Sizing and Cutting Stock Problem in the Paper Industry//TEMA (São Carlos) [online]. 2016. Vol. 17. № 3. P. 305-320.
14. E. Silva, F. Alvelos, J. M. Val'erio de Carvalho. Integrating two-dimensional cutting stock and lot-sizing problems//Journal of the Operational Research Society. 2014. 65. 1. 108-123.
15. J. Sahnó, Ed. Shevtshenko, T. Karaulova, Kh. Tahera. Framework for continuous improvement of production processes//Economics of engineering decisions. Vol. 26. № 2. 2015.
16. R. Rajnoha, K. Gálová, Z. Rózsa. Measurement of Impact of Selected Industrial Engineering Practices on Companies' Economic Performance//Economics of engineering decisions. Vol. 29. № 2. 2018.
17. М. М. Хапаев, А. А. Цыганков. Алгоритм решения экстремальных задач с ограничениями//Вычислительная математика и моделирование. 1997. Т. 8. № 4. С. 322-325.
18. G. Scheithauer. Zuschnitt und Packungsoptimierung. Problemstellungen, Model-lierungs-techniken, Loesungsmethoden. Wiesbaden: Verlag: Vieweg+Taubner, 2008. 132 p.
19. А. Черникова, С. Кузьмина, Г. Кондрашкова, И. Бондаренкова. Оцифровка и аксиоматика в современной метрологии//Серия конференций ИОП: Материаловедение и инженерия. 2019. С. 12-13.
20. В. В. Окрепилов, С. Н. Кузьмина, В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин. Применение суперкомпьютерных технологий для моделирования социально-экономических систем// Экономика региона. 2015. № 2. С. 301-312.
21. ГОСТ Р 53636-2009 ГОСТ Р 53636-2009. Целлюлоза, бумага, картон. Термины и определения. <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-53636-2009>.
22. OST 13-299-87 Хлысты древесные. Методы поштучного измерения и таблицы объемов. <http://docs.cntd.ru/search/intellectual/q/%D0%9E%D0%A1%D0%A2+13-232-87/r/4>.
23. Y. Zhou, J. Hahn, M. Sam Mannan. Fault detection and classification in chemical processes based on neural networks with feature extraction//ISA Transactions. 2003. Vol. 42. P. 651-664.

References

1. M. S. Revunov. Improving the stabilization system of paper flow parameters using the cross-correlation algorithm//Measurement Monitoring Control. Control. 2018. № 4. P. 24-34.
2. I. I. Osovskaya, V. S. Antonova. The influence of surface destruction on the hydrophilicity and ability to form connections of the cellulose fibers//Chemistry of plant raw materials. 2020. № 1. P. 315-320.
3. S. M. Gerasyuta, A. S. Smolin, E. I. Ivanova, V. S. Kanevskaya. Investigation of the coefficient of variation and the average size of the heterogeneity for various types of paper on the AP-2 collet analyzer//Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2016. № 217. P. 238-247.
4. V. V. Abramova, A. V. Gur'ev. Evaluation of Macrostructure Forming Uniformity of Copy Paper//Higher Education News. Forest magazine. 2017. № 4. P. 172-186.
5. D. A. Manoshin. Artificial Intelligence Programming//Colloquium-journal. 2019. № 12 (36).
6. Y. Zhou, T. Murata. Fuzzy-timing Petri net model for distributed mul-timedia synchronization//Proc. of the 1998 IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 11-14. Lolla, California, 1998. P. 244-249.
7. X. Koutsoukos, P. J. Antsaklis, J. A. Stiver, M. D. Lemmon. Supervisory control of hybrid systems//Proc. of IEE. 2000. 88. № 5. P. 1026-1049.
8. Y. Qian, X. X. Li, Y. R. Jiang. An expert system for real-time fault diagnosis of complex chemical processes//Expert Systems with Applications Vol. 24. Issue 4. May 2003. P. 425-432.
9. J. Kallrath, S. Rebennack, J. Kallrath, R. Kusche. Solving real-world cutting stock-problems in the paper industry: Mathematical approaches, experience and challenges//European Journal of Operational Research. 2014. Vol. 238. Issue 1. P. 374-389.
10. H. Dyckhoff. A typology of cutting and packing problems//European Journal of Operational Research. 990. № 44. P. 145-159.
11. I. Harjunkoski. Qualitaetsbasierte Schnittplanoptimierung in der Papierindustrie//Automatisierungstechnik. 2008. № 2. P. 31-44.
12. M. H. Correia, J. F. Oliveira, J. S. Ferreira. Integrated resolution of assignment, sequencing and cutting problems in paper production planning//International Journal of Production Research. 2012. 50 (18). P. 5195-5212.
13. S. C. Poltroniere, S. A. Araujo, K. C. Poldi. Optimization of an Integrated Lot Sizing and Cutting Stock Problem in the Paper Industry//TEMA (São Carlos) [online]. 2016. Vol. 17. № 3. P. 305-320.
14. E. Silva, F. Alvelos, J. M. Val'erio de Carvalho. Integrating two-dimensional cutting stock and lot-sizing problems//Journal of the Operational Research Society. 2014. 65. 1. 108-123.
15. J. Sahnó, Ed. Shevtshenko, T. Karaulova, Kh. Tahera. Framework for continuous improvement of production processes//Economics of engineering decisions. Vol. 26. № 2. 2015.
16. R. Rajnoha, K. Gálová, Z. Rózsa. Measurement of Impact of Selected Industrial Engineering Practices on Companies' Economic Performance//Economics of engineering decisions. Vol. 29. № 2. 2018.
17. М. М. Khapaev, A. A. Tsyganov. An algorithm for the constrained extremum problems//Computational Mathematics and Modeling. 1997. Vol. 8. № 4. P. 322-325.
18. G. Scheithauer. Zuschnitt und Packungsoptimierung. Problemstellungen, Model-lierungs-techniken, Loesungsmethoden. Wiesbaden: Verlag: Vieweg+Taubner, 2008. 132 p.
19. А. Черникова, С. Кузьмина, Г. Кондрашкова, И. Бондаренкова. Digitization and axiomatics in modern metrology//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 12-13.
20. V. V. Okrepilov, S. N. Kuzmina, V. L. Makarov, A. R. Bakhtizin. Application of supercomputer technologies for modeling socio-economic systems /Economy of Region. 2015. № 2. P. 301-313.
21. GOST R 53636-2009 GOST R 53636-2009. Cellyuloza, bumaga, karton. Terminy i opredeleniya <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-53636-2009>.
22. OST 13-299-87. Hlysty drevsnyye. Metody poshtuchnogo izmereniya i tablicy ob»emov. <http://docs.cntd.ru/search/intellectual/q/%D0%9E%D0%A1%D0%A2+13-232-87/r/4>.
23. Y. Zhou, J. Hahn, M. Sam Mannan. Fault detection and classification in chemical processes based on neural networks with feature extraction//ISA Transactions. 2003. Vol. 42. P. 651-664.