
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.316, 004.8

КОНЦЕПЦИЯ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

© 2025 г. А. С. Гордеев^а *, Ф. Ю. Ипатов^а, А. Р. Кузнецов^а

^аАО “СНИИП”, Москва, 123060 Россия

*E-mail: AnSerGordeev@sniip.ru

Поступила в редакцию 23.05.2023 г.

После доработки 23.04.2024 г.

Принята к публикации 22.05.2024 г.

Представлены предложения по применению технологий машинного обучения при создании современных программно-технических средств радиационного контроля на всех этапах жизненного цикла продукции и дается оценка ожидаемых технических результатов от этого применения. Приведены схемы экспериментальных исследований, направленных на подтверждение применимости самообучающихся нейронных сетей в составе устройств детектирования ионизирующих излучений и автоматизированных систем на их основе.

Ключевые слова: машинное обучение, нейронные сети, детектирование ионизирующих излучений, радиационный контроль, автоматизированные системы, цифровая обработка сигналов, метрологические характеристики, интеллектуальные устройства

DOI: 10.56304/S2079562924050130

Технологии машинного обучения (по-английски — “machine learning”, далее — ТМО), наряду с цифровой обработкой данных (т. н. “big data” — большие массивы предварительно не структурированной информации), использованием интерфейсов промышленного интернета вещей (сокр. — ПоГ) и нейронных сетей (далее — НС), а также технологиями моделирования виртуальной и дополненной реальности (сокр. — VR и AR), являются важными элементами современного научно-технического уклада, получившего название “Индустрия 4.0”. Цифровые платформы, созданные с использованием ТМО, обладают рядом конкурентных преимуществ перед традиционными техническими решениями, благодаря которым информационные системы, построенные с их помощью, получают все большее распространение.

Доступность цифровых обработчиков сигналов (диджитайзеров) с высокой разрешающей способностью и широкой полосой пропускания сигналов позволяет разработчикам оборудования радиационного контроля сформировать массивы измерительной информации, соответствующие различным типам детекторов, видам, энергиям и интенсивности ионизирующих излучений, с учетом индивидуальных особенностей конструкции устройств детектирования и режимов их работы: как для одиночных сигналов, так и для их стати-

стически распределенных последовательностей [1]. На основе данных массивов выбираются и реализуются в виде НС оптимизированные математические методы обработки информации, включая алгоритмы поточного распознавания образов сигналов в режиме on-line (область применения коммерческих продуктов — обработка результатов экспериментов в лабораторных условиях, они не предназначены для промышленного применения в режиме длительной непрерывной работы в масштабе реального времени).

Под ТМО в контексте настоящего доклада понимается обучение НС для того, чтобы они решали задачи определенного типа без участия человека, реализуя переход от автоматизированного к автоматическому режиму работы приборов и систем, в условиях неопределенности. Радикальное отличие НС от классического программного обеспечения (далее — ПО) состоит в том, что у нее есть принцип, по которому она обучается, и разработчику необходимо лишь предоставить ей выборку для обучения, чтобы она сама осуществляла обработку данных. Качество внедрения ТМО определяется выбором правильной архитектуры НС и определением классов объектов на выходе, а также корректностью обучающей выборки. С помощью ТМО решаются такие типы задач, как: распознавание образов (классификация), регрессия (получе-

ние конкретных численных значений), прогнозирование временных рядов, кластеризация (выявление классов объектов) и генерация (генеративные НС (сокр. — GAN) появились сравнительно недавно и предназначены для машинного творчества).

Общеизвестны примеры реализации приложений для мобильных устройств для распознавания музыкального контента с помощью ТМО, в последнее время достигнуты значительные успехи благодаря использованию ТМО для решения сложных медицинских задач и других подобных приложениях. Несмотря на свою перспективность с точки зрения повышения селективности, диапазона и точности измерений, в сегменте сенсорных систем и, в частности, в составе аппаратуры радиационного контроля, ТМО в настоящее время широко не применяются во многом из-за сложностей метрологического обеспечения и методических трудностей при верификации результатов измерений на объекте эксплуатации. Решение указанных проблем является приоритетной задачей отечественного ядерного приборостроения. Имеются примеры успешного применения ТМО в ядерном приборостроении, например, в статье [2] описаны положительные результаты работы НС, построенной для распознавания формы импульса со сцинтилляционных детекторов с использованием метода цифровой обработки сигналов PSD (один из методов спектрального анализа). Благодаря ТМО и кластеризации данных показана возможность корректной интерпретации предварительно не обработанного набора данных с детекторов без применения дополнительных инструментов со стороны разработчика ПО НС.

Прикладные задачи развития оборудования АСРК при использовании традиционного подхода достигли пределов совершенствования аппаратуры: при использовании сцинтилляционных детекторов диапазон измерений не превышает 5 десятичных порядков, лучшее значение основной относительной погрешности составляет $\pm 20\%$ на всем диапазоне, возможность идентификации нуклидов (дополнительная задача для спектрометров) полностью определяется разрешающей способностью детекторов. Применение ТМО НС, по мнению авторов доклада, может позволить значительно улучшить метрологические характеристики оборудования автоматизированных систем радиационного контроля (далее — АСРК) с учетом неопределенности, связанной с принципиальными физическими ограничениями первичных измерительных преобразователей по регистрации ионизирующих излучений.

Суть предлагаемой концепции — провести ряд экспериментальных исследований по апробации

ТМО при разработке интеллектуальных устройств детектирования ионизирующих излучений и АСРК на их основе.

Во-первых, ТМО могут применяться в качестве инструмента реализации экспертных функций АСРК для решения задач предиктивной диагностики целостности защитных барьеров с прогнозированием событий и выработки рекомендаций для действий оперативного персонала. Задача НС в таком случае сводится к прогнозированию изменения радиационной обстановки и выдаче рекомендаций персоналу с целью предупреждения и локализации радиационных аварий оператором с помощью доступных средств автоматизации. В рамках этой задачи предлагается выполнить экспериментальные работы, включающие в себя: сбор данных с компактной АСРК, имитирующей группу технологических точек контроля на АЭС в различных режимах работы энергоблока, включая аварийные условия, на полигоне разработчика, создание НС с математической моделью АСРК для АЭС на основе проектных решений по технологии радиационного контроля, обучение НС с использованием массива данных имитационной системы, верификация ПО по массиву архивной информации, полученной на АЭС. Реализации экспертных функций АСРК на базе НС, обученных распознавать режимы работы объекта контроля по динамике показаний групп измерительных каналов радиационного контроля помещений и радиационного технологического контроля, является отдельной задачей, решаемой при развитии программно-технических средств верхнего уровня.

Во-вторых, внедрение ТМО в процессе конструирования оборудования АСРК может способствовать повышению качества измерительной информации (расширение диапазонов, повышение точности, идентификация нуклидов) посредством обучения НС на массивах данных, получаемых после обработки одиночных сигналов (применительно к приборам, в которых требуется разделение вклада нейтронного и гамма-излучения, а также радиометрам α - и β -излучающих аэрозолей для задачи компенсации вклада дочерних продуктов распада радона и контроля реперных нуклидов) или посредством обучения НС на массивах аппаратурных спектров (применительно к жидко-сцинтилляционным α - и β -радиометрам).

Традиционный подход к реализации устройств детектирования АСРК предполагает регистрацию сигналов, их накопление в (N, T) -режиме и обработку арифметическими методами: умножение числа импульсов на коэффициенты — для дозиметров и радиометров, вычисление площади под графиком в определенном диапазоне номеров

энергетических каналов — для спектрометров. Следует обратить внимание на то, что осциллограмма одиночного сигнала со сцинтилляционных блоков детектирования характеризуется рядом параметров (длительность фронтов, амплитуда, скважность, средняя частота импульсов, пульсации, спектры и др.), которые, в свою очередь, изменяются в зависимости от внешних воздействующих факторов. Построение ПО на базе НС и проведение их машинного обучения может обеспечить лучшие по сравнению с традиционным подходом показатели назначения АСРК.

В рамках этой задачи предлагается выполнить ряд экспериментальных работ с использованием ансамбля эталонных источников ионизирующих излучений и сцинтилляционных блоков детектирования, выполнять оцифровку сигналов с помощью диджитайзера, предполагается получить массив измерительных данных, на которых провести обучение нейронной сети на ЭВМ и затем перенести ПО в устройство накопления и обработки информации (УНО) на базе микроконтроллера. Для портирования ПО с обученной НС предлагается использовать серийно выпускаемое АО «СНИИП» изделие типа УНО-280Р, разработанное на базе семейства высокопроизводительной линейки микроконтроллеров STM32F103. При необходимости должна быть выполнена модификация аппаратной части УНО-280Р для обеспечения соответствия необходимым системным требованиям. В качестве критерия работоспособности исследуемого варианта может быть принято достижение значения основной относительной погрешности измерительного канала $\pm 10\%$.

Внедрение ТМО при конструировании оборудования АСРК с применением предварительно выбранного комплекса математических методов (вейвлет-преобразование, преобразование Фурье, метод наименьших квадратов и др.) к параметрам сигналов с блоков детектирования и к характеристикам статистически распределенной последовательности сигналов в перспективе позволит заложить основу для создания платформы программно-технических средств для потоковой обработки информации в режиме on-line с улучшенными метрологическими характеристиками, обеспечиваемыми за счет: разделения ионизирующих излучений по видам (в т. ч. разделение гамма- и нейтронной составляющих по форме сигнала) в смешанных радиационных полях различной интенсивности при разном изотопном составе контролируемых сред (в нестационарных условиях), линеаризации счетной характеристики детектора на границах диапазона измерений, учета зависимости функции отклика детектора от энергии излучения (“ход с жесткостью”), учета “мертвого времени” и погрешности преобразования

АЦП, цифровой режекции наложений импульсов на переднем и на заднем фронте, спектрометрического анализа данных, компенсации фона и спектра комптоновского рассеяния, учета дополнительной погрешности и стабилизации измерительного тракта, введения поправок на индивидуальные особенности блоков детектирования, сокращение методических погрешностей и влияния систематических внешних воздействий.

После проведения описанных выше экспериментальных исследований и экспериментов по апробации ТМО НС и анализа их результатов потребуется решить следующие задачи, направленные на определение граничных условий применимости технологий машинного обучения при конструировании оборудования АСРК.

Применительно к аппаратуре: определить типы блоков детектирования для проведения экспериментальных работ с учетом присущих им принципиальных физических ограничений по диапазону и точности измерений; определить требования к ЭВМ для обучения НС и развернуть комплекс “ЭВМ + диджитайзер + блоки детектирования”; подтвердить возможность использования УНО-280Р для портирования ПО, либо определить объем требуемых доработок аппаратной части УНО и реализовать их на опытном образце; подготовить инфраструктуру для портирования ПО из ЭВМ с обученной НС в прототип УНО.

Применительно к программно-методическому обеспечению: выбрать и обосновать с технической точки зрения перечень математических методов обработки массивов измерительной информации; выбрать и обосновать применяемые методы цифровой обработки сигналов, определить константы и изменяемые параметры, описывающие модели одиночного сигнала и последовательности сигналов; определить перечень образцовых источников ионизирующих излучений, состав их ансамбля и режимов использования при формировании массива данных для обучения НС; зафиксировать перечень внешних воздействующих факторов (радиационных и нерадиационных), учитываемых при выполнении работ; выбрать и приобрести ПО для программирования НС на этапе ее создания и обучения.

В заключении необходимо отметить, что перспективы применения ТМО при конструировании интеллектуальных компонентов АСРК в значительной мере определяются способностью разработчиков по результатам исследований определить целевые задачи радиационного контроля, при решении которых с помощью НС представляется возможным достичь существенного прогресса по сравнению с традиционно используемым подходом, и таким образом занять продуктовую нишу по применимости новых программно-технических средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Nakhostin M.* Signal Processing for Radiation Detectors. 2018. New York: Wiley.
2. *Griths J., Kleinegesse S., Saunders D., Taylor R., Vacheret A.* Pulse Shape Discrimination and Exploration of Scintillation Signals Using Convolutional Neural Networks. Machine Learning Science and Technology. 2020.

Implementation of Machine Learning Technologies for Designing the Ionizing Radiations Smart Detecting Devices Concept

A. S. Gordeev^{1, *}, F. Yu. Ipatov¹, and A. R. Kuznetsov¹

¹*Specialized Scientific Research Institute of Instrumentation, Moscow, 123060 Russia*

**e-mail: AnSerGordeev@sniip.ru*

Received May 23, 2023; revised April 23, 2024; accepted May 22, 2024

Abstract—The paper presents the suggestions about using the machine learning technologies for modern radiation monitoring software and hardware designing during the full production life cycle and the evaluations of the expected technical results deriving from such using illustrated there. There are experimental research schemes shown to confirm the applicability of the self-learning neural networks for the ionizing radiations detecting devices and automated systems based on them.

Keywords: machine learning, neural networks, ionizing radiation detection, radiation monitoring, automated systems, digital signal processing, metrological characteristics, smart devices