

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛНОСВЯЗНЫХ И ВЕРОЯТНОСТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*М. А. РЕБИТВА*

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Российская Федерация*

Мостовые сооружения играют важную роль в транспортной инфраструктуре как отдельных городов, так и целых регионов, на состояние которых влияют различные погодные явления и устойчивые эффекты. В связи с этим в нормативных документах прописана необходимость оборудования таких технически сложных конструкций системами мониторинга, позволяющими контролировать состояние сооружения и принимать меры по поддержанию надлежащего состояния [1].

Для мониторинга состояния сооружения используются различные аппаратные и программные комплексы. Аппаратная часть включает в себя различные датчики и машины для обработки данных с этих датчиков. В программную часть входят такие составляющие, как инструменты по восстановлению данных, их классификации и простейшему анализу этих данных. В существующих системах мониторинга инженерных конструкций (СМИК) и сооружений зачастую нет инструментов, позволяющих дать анализ состояния мостового сооружения или его отдельной части, всё ограничивается лишь выводом данных и, возможно, графического сопровождения с динамикой изменения нагрузки с датчиков [2].

В данный момент в системах мониторинга могут использоваться такие методы, как оценка задержек по времени, нечёткая модель мониторинга, анализ временных рядов и другие [3, 4]. В зарубежных системах мониторинга можно встретить использование искусственного интеллекта, нейронных сетей, в частности. Если не рассматривать нейронные сети, то можно выделить следующие недостатки используемых методов: они не анализируют данные в общей картине, анализ происходит лишь для восстановления пропусков в данных или для сокращения набора данных. В лучшем случае такие методы могут давать прогноз по поведению на основании прошлого опыта без опоры на текущее состояние системы. В таком случае нужен инструмент, который позволил бы проанализировать данные со всех датчиков, относящихся к той или иной конструкции сооружения. Помимо этого, вышеописанные методы проводят анализ в режиме постобработки и выполняются сторонними организациями, что сильно сужает область использования этих методов [5, 6].

В последние годы всё большую популярность набирает использование искусственного интеллекта, в частности нейронных сетей, для анализа большого объёма данных, поскольку они удобны легкой настройкой и могут быть использованы для любого типа задач. Ещё один важный фактор – простота вычислительных операций, так как нейронные сети строятся на простой математической базе, включающей в большей степени перемножение и суммирование элементов. Это сильно разгружает мощности вычислительных машин и не занимает много времени, что отлично подходит для использования на мостовом сооружении. В качестве основы для создания нейронной сети были выбраны полносвязная и вероятностная нейронные сети, т. к. они уже показывали хорошие результаты в анализе состояния отдельных параметров мостовых сооружений [7].

Объектом исследования была выбрана система мониторинга Русского моста во Владивостоке, описанная в [5, 6]. В упрощённом виде СМИК представляет собой комплекс из множества датчиков, поделённых на группы, которые отвечают за различные части мостового сооружения. В группы объединяются различные виды датчиков, объединённые тем, что они отвечают за состояние отдельной конкретной части мостового сооружения. Сгруппированные датчики в ходе работы становились источниками входных воздействий в отдельных нейронных сетях, а затем эти нейронные сети объединялись в комплекс, выполняющийся одновременно.

Сами нейронные сети имеют 3 слоя: входной, скрытый и выходной. Входной слой имеет размерность  $n$ , где  $n$  – число датчиков, отвечающих за соответствующую часть мостового сооружения. В скрытом слое число нейронов уменьшено на 20–30 %, а в выходном слое и вовсе располагается

1 нейрон, отвечающий за вывод сигнала «Истина / ложь», который дает ответ на вопрос «Часть мостового сооружения находится в аварийном состоянии?». При этом каждый нейрон текущего слоя связан со всеми нейронами последующего слоя.

Изначально все связи имели случайные веса, после чего проводилась процедура тренировки, во время которой составлялась таблица размерностью  $2^n$ , где  $n$  – размерность входного слоя. В этой таблице содержатся все возможные комбинации срабатывания нейронов входного слоя и соответствующая им ожидаемая реакция сети. Процесс тренировки требует подбора значения скорости обучения и числа эпох, при этом скорость обучения не должна быть слишком быстрой или слишком медленной, ведь это приведёт к перетренировке нейронной сети в одном случае и недостаточной натренированности в другом. Число эпох необходимо для достижения достаточно низкого значения среднего квадрата ошибки – показателя натренированности сети. Конечно, данной нейронной сети нужно пройти процедуру дообучения во время дальнейшей эксплуатации, что позволит скорректировать данные, которые основаны не только на тренировочных шаблонах, созданных исходя из теоретической эксплуатации мостового сооружения, но и на реальных данных, отличающихся наличием неучтённых факторов у цифрового двойника, а также включающих человеческий фактор в том или ином проявлении. В идеале интеграция нейронной сети должна проходить постепенно, с ручной корректировкой выходного результата со стороны оператора автоматизированного рабочего места, который будет фиксировать истинность / ложность результата работы нейронной сети и отправлять некорректные образцы работы в банк тренировочных данных.

Итоговый комплекс нейронных сетей выполняет вычисления одного набора данных за 0,12 с, а ошибка составляет от 0,004 до 0,005 в зависимости от размера входного слоя сети. Данная скорость выполнения позволяет сделать вывод о том, что нейронную сеть можно использовать в системах мониторинга в реальном времени в качестве системы помощи принятия решения с дальнейшим улучшением структуры самой сети. Получается система аналитики данных, которая помогает принимать решения с высокой степенью автоматизации, позволяющей снизить нагрузку на оператора автоматизированного рабочего места и, более того, позволяющей самостоятельно вызывать службы спасения при возникновении чрезвычайных ситуаций, повышая безопасность мостового сооружения.

Итоговый набор инструментов в данной СМИК может выглядеть следующим образом: система датчиков, разделённая на подгруппы и отвечающая за конкретные различные части сооружения; система первичной обработки данных, выявляющая пропуски в данных и записывающая данные в свои ячейки на данном временном промежутке; система восстановления пропущенных данных, основанная на предыдущих результатах и результатах работы соседних датчиков; система нормализации данных и приведения их к единому стандарту; нейронная сеть, проводящая анализ данных и самодиагностику в рамках определенного набора данных; система фиксации результата и вывода его оператору; система самодиагностики, сравнивающая результаты работы нейронной сети с более ранними.

#### Список литературы

- 1 ГОСТ 32019–2012. Мониторинг технического состояния уникальных зданий и сооружений. Правила проектирования и установки стационарных систем (станций) мониторинга. – Введ. 2014-01-01. – М. : Стандартиформ, 2014. – 130 с.
- 2 Универсальные системы мониторинга как жизненно важные составляющие высокоимунных транспортных систем / Д. В. Ефанов [и др.] // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 5. – С. 20–26.
- 3 Cross-Spectrum-Based Synchronization of Structural Health Monitoring Data / K. Dragos [et. al.] In: P. Rizzo, A. Milazzo // European Workshop on Structural Health Monitoring. EWSHM 2022. Lecture Notes in Civil Engineering. – Vol 254. – DOI : org/10.1007/978-3-031-07258-1\_93
- 4 Данилюк, С. Г. Нечеткая модель для интеллектуальной системы мониторинга технического состояния аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики / С. Г. Данилюк, М. И. Силантьев // Метрология. – 2007. – № 8. – С. 20–26. – EDN MVQIEN.
- 5 Выбор способа фильтрации диагностических данных в системах непрерывного мониторинга объектов транспортной инфраструктуры / Д. В. Ефанов // Транспорт Российской Федерации. – 2020. – № 2. – С. 35–40.
- 6 Технология анализа результатов мониторинга при эксплуатации мостового перехода на остров Русский через пролив Босфор Восточный во Владивостоке / В. Н. Мячин [и др.] // Дороги и мосты. – 2023. – № 1 (49). – С. 177–195.
- 7 Ко, J. M. Structural health monitoring and intelligent vibration control of cable-supported bridges: Research and application / J. M. Ko, Y. Q. Ni // KSCE J Civ Eng 7. – 2003. – P. 701–716.