

**А.Н. ВАСИЛЬЕВ, Г.Ф. МАЛЫХИНА, Д.А. ТАРХОВ**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
a.n.vasilyev@gmail.com

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ К СОЗДАНИЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ \***

Предлагается новый подход к построению нейросетевых моделей сложных кибертехнических систем по разнородной пополняемой информации. Рассматриваются параметрические модели и многослойные функциональные модели сколь угодно высокой точности, основанные на классических численных методах и не требующие применения трудоёмкой процедуры обучения.

A new approach to the construction of neural network models of complex cyber technical systems according to heterogeneous replenished information is proposed. We consider parametric models and multilayer functional models of arbitrarily high accuracy, based on classical numerical methods and do not require the use of time-consuming training procedures.

**Ключевые слова:** цифровые двойники (близнецы), нейросетевое моделирование, параметрические модели, разнородная пополняемая информация

Четвёртая промышленная революция ставит актуальные задачи перед современной наукой. В вычислительных узлах, управляющих сложными кибертехническими объектами, должны функционировать их цифровые двойники (ЦД), которые нельзя заложить в этот узел один раз в неизменном виде, так как моделируемый объект меняется во время функционирования. Виртуальный ЦД реального объекта должен меняться в соответствии с информацией, поступающей от датчиков. Алгоритмы такого изменения должны быть реализованы в упомянутом вычислительном узле.

Индустрия 4.0 невозможна без решения указанных выше проблем. Однако общепринятые в настоящее время методы математического моделирования плохо приспособлены к их решению: отсутствует методология адаптивного математического моделирования сложных систем в режиме

---

\* Данная работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 18-19-00474.

реального времени. Создание подходящего математического и алгоритмического инструментария, позволяющего единообразно решать широкий круг возникающих проблем, является ключевым шагом перехода к Индустрии 4.1, в которой производственные процессы Индустрии 4.0 реализуются на основе унифицированных и более дешёвых технологий.

Комплекс методов создания ЦД и реализующих эти методы алгоритмов основан на исследованиях А.Н. Васильева, Д.А. Тархова, их учеников и последователей. Данные методологии обладают приоритетной новизной и проверены на многочисленных модельных и реальных задачах [1].

Авторами дан унифицированный процесс построения и поддержания в актуальном состоянии ЦД реальных объектов. В работе указаны его этапы и приведены конкретные примеры их реализации.

Предлагаемые нейросетевые подходы в построении ЦД позволяют моделировать работу технических систем в реальном масштабе времени, получая при этом достоверные результаты для дальнейшего анализа.

Авторами разработано несколько десятков методов и алгоритмов, сочетающих структурную и параметрическую адаптацию нейронных сетей. Эти методы обладают высокой эффективностью при построении приближённых нейросетевых решений прямых и обратных задач для дифференциальных уравнений; они не приводят к «кризису размерности», позволяют рассматривать случаи неточно заданных коэффициентов, задачи со сложной геометрией; при этом соответствующие алгоритмы допускают естественное распараллеливание. Данные методы можно использовать как для создания новой парадигмы суперкомпьютерных вычислений (когда пользователь получает не новый массив чисел, а параметрическую модель), так и в системах управления сложными техническими объектами.

Разработаны методы и алгоритмы обучения параметрических сетей, для которых параметры задачи включены в число входных переменных, и методы построения многослойных (в том числе нейросетевых) решений дифференциальных уравнений сколь угодно высокой точности, основанные на модификации классических численных методов и не требующие применения трудоёмкой процедуры обучения. Данные приближенные решения имеют аналитическую форму, естественным образом включают в себя параметры задачи и допускают дальнейшее уточнение по данным наблюдений за моделируемым объектом.

#### *Список литературы*

1. Tarkhov D., Vasilyev A. Semi-empirical Neural Network Modeling and Digital Twins Development// Elsevier, Academic Press, 2019, 288 p.