### **РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2**

***Белоус Ф.В.\*, Токарев А.Ю., Пономаренко А.М.***

студент, студент, аспирант

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*

*\*E–mail: belous.fv@edu.spbstu.ru*

Основной режим работы токамаков в настоящее время – режим улучшенного удержания или H-мода, характеризуется большими значениями градиента давления на периферии [1], что является причиной возникновения различных неустойчивостей, в частности, периферийных локализованных мод (ELM). ELM считаются результатом срыва из потока плазмы множественных филаментов и приводят к импульсным выбросам частиц и энергии из области удержания на первую стенку и пластины дивертора, что может привести к повреждению установки [2]. В связи с этим изучение возникновения и развития филаментов является важной и актуальной задачей в настоящее время, которой занимаются, в том числе, на сферическом токамаке Глобус-М2.

Для изучения филаментов и других неустойчивостей часто используется диагностика допплеровского обратного рассеяния (ДОР), установленная на токамаке Глобус-М2. Система ДОР представляет из себя 2 многочастотных рефлектометра с 10 частотами зондирования. На её выходе формируются IQ сигналов, в которых филаменты выглядят как плавно возрастающие и убывающие по амплитуде гармоники, что облегчает их визуальное обнаружение и классификацию. Однако длительность одного филамента относительно сигнала очень мала (порядка 10 мкс относительно 100 мс), что приводит к увеличению времени для нахождения одного филамента, а в рамках их нахождения в режиме реального времени делает эту задачу вручную невыполнимой. С такой задачей более успешно справится система, которая в автоматическом режиме будет способна не только находить филаменты, исходя из данных диагностики ДОР (и других), но и определять их параметры и характеристики.

Одними самых из мощных способов, позволяющих быстро и эффективно изучать аномалии в сигналах, является быстрое преобразование Фурье (Fast Fourier Transform, FFT) и фильтр Баттерворта [3, 4]. Алгоритм FFT основан на методе разделяй и властвуй: разбиение вычислений на подзадачи более маленького размера, уменьшая сложность алгоритма от O(n^2) до O(n\*log n), что позволяет эффективно вычислить дискретное преобразование Фурье числовой последовательности. Фильтр Баттерворта — это аналоговый фильтр, предназначенный для подавления или усиления определенных частот сигнала. Он основан на полиномиальной аппроксимации частотной характеристики системы и предоставляет равномерную амплитудно-частотную характеристику в заданном диапазоне частот. С помощью этих алгоритмов была разработана система выявления участков сигнала плазмы, на которых могут быть филаменты.

Благодаря применению нейросетевых фильтров для итоговой классификации полученных участков удалось добиться существенного прироста точности. В данной работе рассматривается гибридная свёрточная нейросеть (Multibranch convolutional neural network), настроенная на обработку сигналов и их метаданных [5]. На её основе проведено исследование процесса принятия решения нейросетью, что имеет большое значение для дальнейших работ по автоматизированной системе диагностики и контроля плазмы в токамаках. Кроме того, приведено сравнение работы данной нейросети с более простой моделью авто-энкодера (autoencoder neural network).

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 23-72-00024.

**Литература.**

1. Wagner F., Plasma Phys. Control. Fusion, 2007, 49, B1.
2. Connor J. W. et al, AIP Conf. Proc., 2008, 1013 (1), 174–190.
3. Shibendu Mahata, Norbert Herencsa, David Kubanek, Optimal Approximation of Fractional-Order Butterworth Filter Based on Weighted Sum of Classical Butterworth Filters, 2021
4. Shuangbao Shu, Jin Lai, Zhiqiang Chen, Yong Wang, Yuzhong Zhang, Xiaojie Tao, Xianli Lang, JingJing Chen, Design and implementation of plasma electron density measurements based on FPGA with all-phase FFT for tokamak devices, 2021
5. Youzhi Liang, Wen Liang, Jianguo Jia, Structural Vibration Signal Denoising Using Stacking Ensemble of Hybrid CNN-RNN, 2023