

## СРАВНЕНИЕ СПОСОБОВ ВВОДА ДАННЫХ В СИСТЕМУ РЕЗЕРВУАРНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Даниленко Г.О. (ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»),

Ковалев А.В. (ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»)

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Ковалев А.В.

(ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»)

**Введение.** Резервуарные вычисления (РВ) – это современный метод реализации нейронных сетей, основанный на отклике некоторой нелинейной динамической системы – резервуара на входной сигнал. Состояние резервуара зависит как от текущего входного сигнала, так и от предыдущего состояния самого резервуара. Таким образом, система РВ демонстрирует свойство памяти, которое характеризуется количественной характеристикой – емкостью памяти. Преимущество РВ по сравнению с другими рекуррентными нейронными сетями проявляется в упрощении процесса обучения, в результате чего требуется оптимизация только выходного слоя системы [1]. В настоящей работе резервуаром является лазерный диод с оптоэлектронной обратной связью, подверженной полосовой фильтрации. Такая система является частным случаем системы РВ с запаздыванием, реализованной посредством мультиплексирования входных данных во времени. Данная работа направлена на исследование влияния способов ввода данных в систему РВ на емкость памяти и способность решать задачу предсказания хаотического временного ряда.

**Основная часть.** Исследуемая система резервуарных вычислений основана на лазерном диоде с оптоэлектронной обратной связью. Ввод данных в систему резервуарных вычислений осуществлялся путем модуляции параметра накачки, что с точки зрения физической реализации является самым простым способом. Однако к полупроводниковым лазерам могут применяться другие способы модуляции параметров выходного излучения, которые могут быть использованы для ввода данных в резервуар. В данной работе рассматривается модуляция внутрирезонаторных потерь, например, за счет размещения в резонаторе лазера пассивной секции, к которой прикладывается обратное напряжение смещения, и модуляция интенсивности инжектируемого в резонатор излучения. Предполагается, что частота инжектируемого излучения совпадает с частотой лазерной генерации.

Сравнение методов ввода данных осуществлялось по двум характеристикам: емкость памяти и эффективность решения задачи Santa-Fe. Емкость памяти количественно характеризует способность системы восстанавливать введенные в резервуар входные данные в предыдущие времена ввода [2]. Задача Santa-Fe – это часто применяемая к системам РВ эталонная задача, которая заключается в прогнозировании хаотического временного ряда, состоящего из дискретных по времени значений интенсивности лазера [3]. Эффективность решения задачи оценивалась по результатам вычисления нормализованной среднеквадратичной ошибки (NMSE). Сравнение выполнялось для оптимизированной системы, которая обладала наименьшим значением меры  $D$ , которая характеризует пологость спектра собственных значений и его положение относительно мнимой оси [4]. При исследовании модуляционных характеристик большая амплитуда отклика достигается при модуляции интенсивности инжектируемого в резонатор излучения и при модуляции внутрирезонаторных потерь. Модуляция параметра накачки демонстрирует в 2 раза меньший по амплитуде отклик. При сравнении модуляции потерь в резонаторе с модуляцией параметра накачки емкость памяти увеличивается незначительно (с 40.6 до 40.8), однако NMSE при решении Santa-Fe снижается на 20% (с 0.06 до 0.048). Причем наименьшее значение достигается для отрицательной обратной связи, в отличие от полученных ранее результатов

[5]. При модуляции интенсивности инжектируемого в резонатор излучения емкость памяти снижается до 40.2, но NMSE уменьшается на 5% до 0.057.

**Выводы.** Было исследовано влияние способов модуляции входного сигнала в систему на характеристики системы резервуарных вычислений. Ввод данных посредством модуляции потерь в резонаторе лазера позволяет достичь лучших результатов (большая емкость памяти, меньшая ошибка при решении задачи Santa-Fe) по сравнению со способом модуляции параметра накачки. Модуляция интенсивности инжектируемого излучения не показала значительного улучшения по отношению к модуляции параметра накачки.

#### **Список использованных источников:**

1. Lugnan A. и др. Photonic neuromorphic information processing and reservoir computing //APL Photonics. – 2020. – Т. 5. – №. 2. – С. 020901.
2. Jaeger H. Short term memory in echo state networks. gmd-report 152 //GMD-German National Research Institute for Computer Science. – 2002.
3. Soriano M.C. и др. Optoelectronic reservoir computing: tackling noise-induced performance degradation //Optics express. – 2013. – Т. 21. – №. 1. – С. 12-20.
4. Danilenko G.O. и др. Impact of filtering on photonic time-delay reservoir computing // Chaos An Interdiscip. J. Nonlinear Sci. – 2023. – Т. 33, № 1. – С.013116.
5. Dmitriev P.S. и др. Asymmetrical performance of a laser-based reservoir computer with optoelectronic feedback // Opt. Lett. – 2020. – Т. 45, № 22. – С.6150–6153.