УДК 681.5:004.383.8 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-51-54

ВСТРОЕННАЯ АНАЛОГОВАЯ НЕЙРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Дембицкий Н.Л.
Московский авиационный институт (Научно-исследовательский университет), Москва

Ключевые слова: киберфизическая система, жесткое реальное время, аналоговый нейропроцессор, континуальный процессор, континуальная логика, трехзначная континуальная логика.

Аннотация. Физические процессы, которыми управляют киберфизические системы, по своей природе непрерывны и имеют аналоговый характер. Особую научную и практическую значимость в них представляет детерминизм и предсказуемость времени отклика. Создание вычислительных систем управления, способных гарантированно удовлетворять требованиям жесткого реального времени, является одной из наиболее острых проблем на стыке микроэлектроники, теории управления, искусственного интеллекта, робототехники. Цель работы - создание встроенных аналоговых вычислительных сетей на основе нейропроцессоров для управления техническими объектами в условиях жесткого реального времени. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: разработка аналоговых нейропроцессоров, обеспечивающих темпоральную синхронизацию сигналов управления с физическими процессами киберфизической системы; минимизация задержек на границе «физический мир – кибернетическая модель» путем симбиоза аналоговых вычислителей с агрегатами технической системы; разработка континуальной логики синтеза сигналов управления в аналоговых вычислительных устройствах;
– создание встроенных аналоговых алгоритмов управления.

ANALOG COMPUTING NETWORKS FOR REAL-TIME CONTROL SYSTEMS

Dembitsky N.L.
Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

Keywords: cyber-physical system, hard real-time, analog neuroprocessor, continuum processor, continuum logic, three-valued continuum logic.

Abstract. The physical processes governed by cyber-physical systems are, by their very nature, continuous and analog. Within these systems, determinism and the predictability of response times are of particular scientific and practical importance. Developing computational control systems capable of reliably meeting hard real-time requirements remains one of the most critical challenges at the intersection of microelectronics, control theory, artificial intelligence, and robotics. The goal of this work is to create embedded analog computing networks based on neuroprocessors for controlling technical systems under strict real-time constraints. To achieve the stated objective, the following tasks were addressed: development of analog neuroprocessors that ensure the temporal synchronization of control signals with the physical processes of a cyber-physical systems; minimization of latency at the interface between the physical world and the cybernetic model through the symbiosis of analog computing units with the components of a technical system; development of a continuum-based logic for synthesizing control signals within analog computing devices;
– creation of embedded analog control algorithms.

Аналоговая модель взаимодействия процессов в технической системе

Поставленная цель повышения быстродействия при снижении массогабаритных показателей встроенной системы управления техническими объектами достигается внедрением в каждый агрегат надстройки в виде аналоговых вычислителей-агентов [1]. Агенты и агрегаты формируют аналоговую киберфизическую систему (КФС) (АКФС) жесткого реального времени (ЖРВ) (рис. 1), в которой агрегаты связаны энергетическими потоками $E(t)$, а агенты информационными сигналами $\Psi(t)$. Симбиоз аналоговых агентов и физических процессов объекта формирует имманентное вычислительное устройство. В такой архитектуре выработка управляющих команд является не результатом последовательной цифровой обработки данных, а естественным, непрерывным откликом АКФС, где физическая динамика объекта непосредственно участвует в логике принятия решений, обеспечивая темпоральную синхронность без вычислительных задержек. Физический процесс здесь не просто объект управления, а часть вычислительного ресурса.

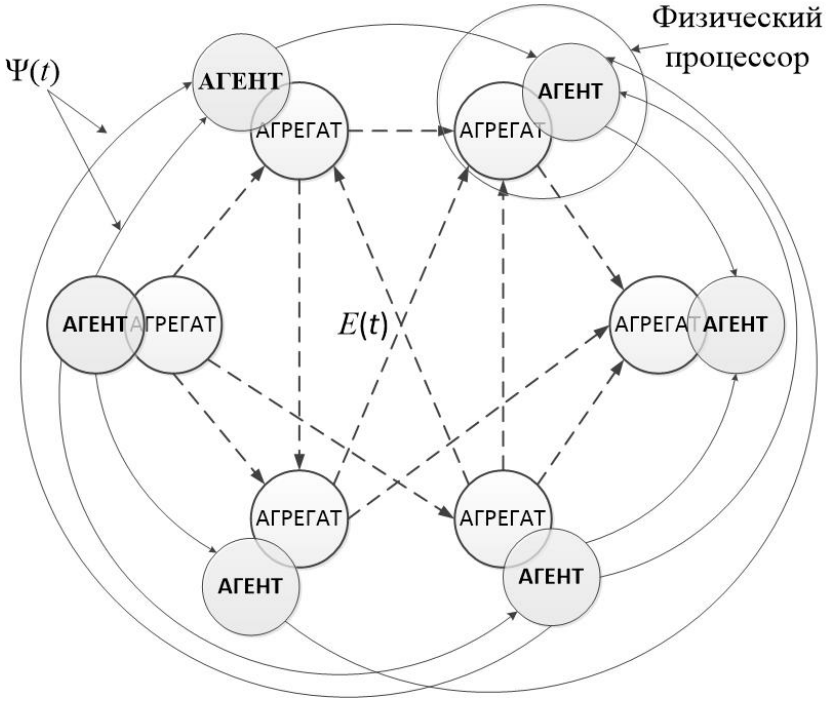


Рис. 1. Аналоговая киберфизическая сеть

Аналоговые нейропроцессоры

Аналоговый нейропроцессор (АНП) является новым типом аналоговых вычислительных устройств [2]. Его применение позволяет преодолевать теоретические и технические препятствия создания систем управления в условиях ЖРВ. Основанный на аппроксимации функций Колмогорова–Арнольда, благодаря переходу от фон-неймановской архитектуры к аналоговым преобразованиям сигналов, он обладает уникальным сочетанием быстродействия, энергоэффективности и структурной компактности.

Получая на вход параметры $\bar{X} = \{x_1(t), x_2(t), ..., x_n(t)\}$, АНП синтезирует сигнал $r(t) = f(\bar{X})$. Одновременно АНП оповещает систему о передаче функционального сигнала. Таким образом, каждый сигнал в АКФС приобретает функциональную и логическую характеристику.

Эффективность АНП обусловлена синергией функциональных и физических особенностей аналоговой вычислительной парадигмы. В отличие от цифровых нейросетевых реализаций предложенная архитектура обеспечивает следующие преимущества:

1. Сверхнизкие задержки и детерминированность времени отклика.
2. Отсутствие многократных преобразований АЦП/ЦАП.
3. Встроенная естественная согласованность с непрерывными физическими процессами.
4. Генерирование сигналов управления с частотой до нескольких МГц.
5. Эффективность обучения по сравнению с многослойными нейросетями.

Аналоговые автоматы и алгоритмы управления устройствами

Система управления аналоговыми вычислениями развивается в направлении унификации элементной базы, расширения логических и алгоритмических возможностей агентов АКФС на базе континуальных процессоров (КП) [3], основным элементом которых является АНП. Условия синтеза аналоговых сигналов в КП можно представить в виде конъюнктивного объединения трех бинарных функций:

$$q(t) = Q\left(x_1, x_2, ..., x_n\right) \wedge \varphi \wedge v_0\left(x_1, x_2, ..., x_n\right). \quad (1)$$

Функция Q проверяет существование (передачу) сигналов $\overline{X} = (x_1, x_2, ..., x_n)$ в АКФС. Функция φ связана с проверкой внешних условий блокировки вычислений. Функция v получает значение логической единицы при нахождении сигналов $x_1, x_2, ..., x_n$ в области определения функции *f*. Появление управляющего сигнала $r(t) = f(\overline{X})$ в системе происходит при выполнении условия (1). Логический сигнал $q(t)$ непрерывно присутствует в системе, передавая мгновенную информацию о структуре вычислительного процесса.

Применение КП позволяет реализовать синтез сигналов управления на основе комбинационной и секвенциальной континуальной логики [4]. Выполняя операции в мегагерцовом диапазоне с минимальными энергетическими затратами, КП расширяют возможности оперативного управления за счет непрерывного анализа событий в КФС и применения аппаратных алгоритмов.

Рассмотренные в докладе технические решения открывают путь для практического применения аналоговых вычислительных средств в КФСЖРВ. В микроэлектронике дальнейшее развитие предложенного подхода видится в создании унифицированных библиотек аналоговых логических элементов и их интеграции в системы управления.

Список литературы

1. Дембицкий Н.Л. Применение аналоговых процессоров и киберфизических сетей в технических системах и устройствах. – М.: МАИ, 2022. – 162 с.
2. Патент №2866739 РФ. Нейросетевое устройство и способ синтеза аналоговых сигналов многомерных функциональных зависимостей / Н.Л. Дембицкий. – Заявка №2026113052 от 28.04.2026; опубл.21.07.26, Бюл. №21.
3. Патент №2739723 РФ. Континуальный процессор / Н.Л. Дембицкий. – Заявка №2020131605 от 25.09.2020; опубл. 28.12.2020, Бюл. №1.

4. Патент №2795450 РФ. Автомат троичной логики и способ его применения для управления агрегатами технической системы / Н.Л. Дембицкий. – Заявка №2022130038 от 18.11.2022; опубл.03.05.23, Бюл. №13.

Сведения об авторе:
Дембицкий Николай Леонидович – к.т.н., доцент.