Гибридная архитектура интеллектуального управления производственными системами на основе технологии цифровых двойников и алгоритмов предиктивной аналитики

Стаценко Артём Александрович

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

г. Москва, Российская Федерация

Современная производственная система представляет собой совокупность взаимосвязанных технологических операций, оборудования, потоков данных и контуров управления. Её эффективность определяется одновременно качеством продукции, производительностью, энергопотреблением, состоянием оборудования и безопасностью. При изменении режима работы статические правила управления и фиксированные веса критериев перестают отражать фактические приоритеты системы. В связи с этим актуальна разработка гибридной архитектуры, объединяющей цифровой двойник, предиктивную аналитику и методы системного анализа [1, 2].

Цель работы – сформировать архитектуру интеллектуального управления производственной системой и предложить адаптивный алгоритм выбора управляющего воздействия на основе цифрового двойника. Цифровой двойник рассматривается как виртуальная модель объекта, синхронизируемая с физической системой по данным датчиков, MES/SCADA и журналов эксплуатации. Он используется для оценки текущего состояния, моделирования сценариев и предварительной проверки решений до их передачи исполнительному контуру [1].

Предлагаемая архитектура включает пять уровней: физический, интеграционный, модельный, аналитический и управляющий. На физическом уровне формируются измерения и исполняются команды. Интеграционный уровень выполняет синхронизацию потоков, обработку пропусков, оценку качества данных и выявление дрейфа. Модельный уровень содержит цифровой двойник и набор физических либо гибридных моделей. Аналитический уровень прогнозирует качество, риск отказа, производительность и энергопотребление.

На управляющем уровне выполняются системное взвешивание критериев, оптимизация и safety-проверка команд [3, 4].



Рисунок 1 – UML-диаграмма работы гибридной архитектуры AEF-MPC

В качестве алгоритмического ядра предлагается AEF-MPC – адаптивное доказательное нечёткое прогнозирующее управление. На первом этапе для каждого источника рассчитывается оценка доверия, зависящая от полноты потока, расхождения измерения с прогнозом цифрового двойника, дрейфа распределения и локальной неопределённости. На втором этапе нечёткий AHP используется для получения начальных весов критериев: качества, риска, производительности, энергии, стоимости вмешательства и устойчивости. Затем веса адаптируются по текущему производственному режиму и надёжности источников [5, 6]. Такое построение сохраняет интерпретируемость экспертного задания при изменении состояния системы.

На третьем этапе предиктивные модели формируют прогнозы на горизонте управления. Оптимизатор MPC сравнивает альтернативные последовательности управляющих воздействий по суммарной стоимости отклонения качества, вероятности отказа, энергопотребления, потерь производительности и неопределённости. В расчёте явно задаются ограничения на диапазоны исполнительных механизмов, скорость изменения команд, допустимое качество и максимальный риск. Решение передаётся в цифровой двойник для виртуальной проверки, после чего через safety-фильтр направляется в физический контур [2, 7].

После исполнения команды фактическая реакция объекта сравнивается с прогнозом. Разность используется для обновления состояния цифрового двойника, доверия к источникам и параметров предиктивных моделей. В журнале решения сохраняются выбранное действие, активные ограничения, веса критериев и ожидаемый эффект. Это обеспечивает трассируемость и позволяет выявлять ситуации, в которых отдельная модель или источник систематически переоценивает либо недооценивает риск [3, 6].

Для проверки алгоритма целесообразно использовать цифровой двойник производственной ячейки или линии и сравнить четыре варианта: статические правила, обычный MPC без адаптивных весов, data-driven контроллер и AEF-MPC [1–3]. Тестовые сценарии должны включать нормальную работу, изменение производственного задания, шум и пропуски датчиков, дрейф моделей, отказ оборудования и конфликтующие сигналы. Основными показателями являются ошибка качества, время цикла, энергопотребление, число нарушений ограничений, точность прогноза отказа, доля ложных тревог и время восстановления.

Предложенный алгоритм является проектируемой методикой; экспериментальные результаты для конкретной производственной линии в работе не заявляются. Ограничениями являются зависимость от качества цифрового двойника, необходимость синхронизации данных и вычислительные требования MPC. При внедрении необходимы ограничитель команд, контроль допустимых режимов, аварийный fallback-контур и участие оператора при критических действиях [4].

Таким образом, объединение цифрового двойника, предиктивной аналитики и адаптивного системного анализа позволяет перейти от изолированного прогноза к замкнутому интеллектуальному управлению. Научно-практическая перспективность подхода связана с тем, что изменение весов критериев определяется не только экспертными приоритетами, но и текущим качеством данных, расхождением модели с объектом и активными ограничениями безопасности.

Список использованной литературы

1. Sobottka T., Halbwidl C., Gaal A. et al. Optimizing operations of flexible assembly systems: demonstration of a digital twin concept with optimized planning and control, sensors and visualization // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2025. DOI: 10.1007/s10845-024-02537-6.

2. Chen Y.-P., Karkaria V., Tsai Y.-K. et al. Real-time decision-making for Digital Twin in additive manufacturing with Model Predictive Control using time-series deep neural networks // Journal of Manufacturing Systems. – 2025. – Vol. 80. – P. 412–424. DOI: 10.1016/j.jmsy.2025.03.009.

3. Luo W., Hu T., Ye Y. et al. A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2020. – Vol. 65. – Article 101974. DOI: 10.1016/j.rcim.2020.101974.

4. Stavropoulos P., Papacharalampopoulos A., Michail C.K., Chryssolouris G. Robust Additive Manufacturing Performance through a Control Oriented Digital Twin // Metals. – 2021. – Vol. 11, No. 5. – Article 708. DOI: 10.3390/met11050708.

5. Abdullah F.M., Al-Ahmari A.M., Anwar S. A Hybrid Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Model for Evaluating the Influence of Industry 4.0 Technologies on Manufacturing Strategies // Machines. – 2023. – Vol. 11, No. 2. – Article 310. DOI: 10.3390/machines11020310.

6. Kuhnle A., Kaiser J.-P., Theiß F. et al. Designing an adaptive production control system using reinforcement learning // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2021. – Vol. 32. – P. 855–876. DOI: 10.1007/s10845-020-01612-y.

7. Sarda K., Del Vecchio C., Fruggiero F. et al. Physics-Enhanced Digital Twin based solution to control process state in a Steel Manufacturing plant // IFAC-PapersOnLine. – 2024. – Vol. 58, No. 8. – P. 31–36. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.08.046.