

УДК 621.865.8:681.5

***Гибадулин Руслан Рашитович,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем,
направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических
процессов и производств»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»***

Россия, г. Москва

***Сидоренко Максим Сергеевич,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»***

Россия, г. Москва

***Колесников Евгений Александрович,
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»***

Россия, г. Москва

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМОЙ

Аннотация: В статье рассматривается построение интеллектуального управления роботизированной производственной системой как развитие традиционной иерархии промышленной автоматизации. Предложена архитектура, объединяющая контур сбора данных, модель текущего состояния, модуль прогнозирования, многокритериальный выбор управляющего воздействия и независимый контур технологических и безопасностных ограничений. Сформирован алгоритм принятия решений, позволяющий учитывать длительность операций, энергозатраты, техническое состояние оборудования и

отклонение от производственного плана. На расчетном примере показан принцип выбора управляющей стратегии без переноса функций функциональной безопасности на интеллектуальный модуль. Практическая значимость работы состоит в возможности поэтапного внедрения интеллектуальных функций поверх существующих ПЛК, контроллеров роботов и средств диспетчеризации.

Ключевые слова: роботизированная производственная система, интеллектуальное управление, промышленный робот, программируемый логический контроллер, принятие решений, диагностика, оптимизация, адаптивное управление.

Annotation: The article considers intelligent control of a robotic production system as an extension of the traditional industrial automation hierarchy. An architecture is proposed that combines data acquisition, current-state estimation, forecasting, multi-criteria selection of control actions and an independent layer of technological and safety constraints. A decision-making algorithm is formulated to account for operation time, energy consumption, equipment condition and deviations from the production plan. An illustrative calculation demonstrates the principle of selecting a control strategy while keeping functional safety outside the intelligent module. The proposed approach enables gradual implementation of intelligent functions on top of existing PLCs, robot controllers and supervisory systems.

Key words: robotic production system, intelligent control, industrial robot, programmable logic controller, decision making, diagnostics, optimization, adaptive control.

Роботизированные производственные системы применяются для выполнения операций механической обработки, сборки, сварки, сортировки, транспортирования и обслуживания технологического оборудования. Их производительность определяется не только скоростью отдельных манипуляторов, но и согласованностью работы станков, транспортных

устройств, датчиков, систем технического зрения и управляющих контроллеров. По мере роста числа взаимосвязанных элементов традиционное программное управление, основанное на жестко заданной последовательности переходов, становится недостаточно гибким при изменении загрузки, появлении технологических отклонений или ухудшении технического состояния оборудования.

Современное направление развития промышленной автоматизации связано с переходом от фиксированного управления к системам, способным анализировать состояние производственной среды и выбирать вариант дальнейших действий с учетом нескольких критериев. В российской научной литературе рассматриваются подходы к автоматизированному управлению производством робототехнических комплексов, модульному построению робототехнических средств, самообучающимся системам и интеграции сенсорной информации [4–6; 9]. При этом интеллектуализация не должна подменять базовые функции ПЛК, контроллера робота и подсистемы безопасности: ее задача состоит в формировании более обоснованных решений на уровне выбора режима, приоритета задания, маршрута или последовательности операций.

Под интеллектуальным управлением в рамках данной работы понимается надстройка над детерминированными контурами автоматизации, которая формирует решение на основе совокупности текущих данных, модели состояния и заданной целевой функции. Нижний уровень при этом остается классическим: сервоприводы выполняют команды движения, контроллер робота обеспечивает кинематику и локальный цикл, ПЛК реализует межблокировки и последовательностную логику, а контур безопасности контролирует аварийный останов, защитные ограждения и другие критические функции. Такое разделение соответствует общей логике стандартизации промышленной робототехники и позволяет не смешивать оптимизационные алгоритмы с обязательными защитными функциями [1–3].

Интеллектуальный уровень должен получать данные о производственном задании, наличии деталей, состоянии рабочих позиций, текущем режиме роботов, длительности последних циклов, энергопотреблении, диагностических признаках и событиях простоя. На основе этих данных формируется модель состояния системы. В отличие от простого набора сигналов модель должна отражать не только текущее значение переменных, но и их взаимосвязи: доступность ресурсов, занятость оборудования, допустимые последовательности операций, накопленный риск отказа и ограничения производственного плана.

Таблица 1.

Информационные группы для интеллектуального уровня управления

Группа данных	Примеры параметров	Источник	Использование
Технологическое состояние	готовность станка, наличие детали, этап операции	ПЛК, датчики	проверка допустимости действия
Состояние робота	режим, занятость, позиция, код ошибки	контроллер робота	выбор задания и маршрута
Диагностика	температура приводов, перегрузки, счетчики, вибрация	приводы, датчики, журнал событий	оценка технического риска
Производственный план	приоритет заказа, срок, требуемое количество	MES / оператор	формирование целевой функции
Ресурсные показатели	время цикла, энергозатраты, загрузка оборудования	SCADA, счетчики, архив	оптимизация режима

Важным свойством интеллектуальной системы является способность работать с неполной или противоречивой информацией. Например, сигнал «деталь присутствует» может подтверждаться датчиком, системой технического зрения и состоянием предыдущей операции. Если источники расходятся, целесообразно не выдавать немедленную команду на движение, а перейти в состояние уточнения. Подходы к интеграции сенсорных данных для оценки состояния робототехнических объектов показывают, что объединение нескольких источников позволяет повысить достоверность оценки при динамично изменяющейся обстановке [9].

На рисунке 1 представлена предлагаемая архитектура. Она включает шесть функциональных элементов: контур данных, модель состояния, интеллектуальный модуль принятия решений, блок оптимизации, роботизированную ячейку и независимый контур ограничений. SCADA или MES задает производственную цель и получает отчетную информацию, но не участвует непосредственно в формировании движений робота.



Рисунок 1. Архитектура интеллектуального управления роботизированной производственной системой

Контур данных формирует единое информационное пространство из сигналов ПЛК, роботов и измерительных подсистем. Модель состояния преобразует набор сырых параметров в признаки, пригодные для принятия решения: «позиция доступна», «робот может принять новое задание», «вероятность вынужденной остановки повышена», «заказ имеет высокий приоритет». Для этого могут использоваться логические правила, статистические оценки, экспертные пороги и модели машинного обучения. Выбор конкретного метода зависит от объема накопленной истории и требований к объяснимости результата.

Модуль принятия решений формирует несколько допустимых действий. Например, при освобождении двух рабочих позиций система может направить манипулятор к позиции с более высоким приоритетом, временно перераспределить задание второму роботу, изменить очередность обработки

или запланировать кратковременную технологическую паузу для снижения риска отказа.

Подобная декомпозиция особенно важна для промышленной среды. ГОСТ Р 60.1.2.1-2016 определяет требования безопасности для промышленных роботов, а ГОСТ Р 60.1.2.2-2016 распространяет требования на робототехнические системы и их интеграцию [2; 3]. Следовательно, интеллектуальный алгоритм следует проектировать как элемент технологического управления, а не как замену независимым защитным функциям.

Алгоритм формирования управляющего решения

Предлагаемый алгоритм выполняется циклически с периодом, достаточным для задач диспетчеризации и перераспределения производственных операций. Его не требуется выполнять с периодом сервоконтуров робота. На первом этапе собираются данные и проверяется их актуальность. На втором этапе рассчитывается состояние оборудования и определяется список доступных ресурсов. На третьем этапе формируется множество допустимых действий. После фильтрации по технологическим и безопасностным ограничениям оставшиеся варианты оцениваются по многокритериальному показателю.

Для выбора действия предлагается использовать нормированную функцию качества, в которой меньшему значению соответствует более предпочтительная стратегия:

$$J = w_1 \cdot T + w_2 \cdot E + w_3 \cdot R + w_4 \cdot D, \quad \sum w_i = 1,$$

где T — нормированная оценка времени выполнения; E — относительные энергозатраты; R — показатель технического риска; D — отклонение от производственного плана; $w_1 \dots w_4$ — веса критериев. Весовые коэффициенты определяются в соответствии с приоритетами конкретного производства. Для линии с жесткими сроками наибольший вес может иметь T и D , а для режима ограниченного энергопотребления увеличивается вес E . Показатель R должен иметь высокий приоритет, если диагностические

признаки свидетельствуют о приближении оборудования к предельному состоянию.

После выбора минимального значения J интеллектуальный модуль не отправляет команды непосредственно на сервоприводы. Он формирует задание более высокого уровня: номер технологической операции, назначение робота, приоритет маршрута, режим производительности или требование выполнить сервисную проверку. ПЛК и контроллер робота преобразуют это решение в штатную последовательность команд. Такая структура обеспечивает совместимость с существующей автоматизацией и упрощает верификацию.

Расчетный пример выбора стратегии

Рассмотрим условную роботизированную систему, в которой после завершения текущей операции возможны три действия: А - немедленно передать деталь на первую позицию, В - направить ее на альтернативную позицию, С - кратковременно перераспределить задание и использовать другой роботизированный ресурс. Для демонстрации примем веса критериев $w_1 = 0,40$, $w_2 = 0,20$, $w_3 = 0,25$ и $w_4 = 0,15$. Значения критериев нормированы в диапазоне от 0 до 1, причем меньшая величина соответствует лучшему состоянию.

Таблица 2.

Расчетный пример многокритериального выбора

Стратегия	Т	Е	Р	Д	Ж
А	0,60	0,50	0,20	0,40	0,450
В	0,40	0,70	0,30	0,30	0,420
С	0,50	0,40	0,10	0,20	0,335

Расчет показывает, что стратегия С имеет минимальное значение $J = 0,335$ и должна быть выбрана, хотя по отдельному критерию времени она уступает варианту В. Причина состоит в меньших энергозатратах, низком техническом риске и меньшем отклонении от плана. Этот пример является иллюстративным и не представляет результаты натурального эксперимента. Его назначение - показать принцип принятия решения, когда оптимальный

вариант определяется совокупностью факторов, а не одним локальным показателем.

На практике значения T , E , R и D могут рассчитываться различными методами. Время операции определяется по текущей очереди и статистике циклов, энергозатраты - по измерениям приводов или модели нагрузки, технический риск - по диагностическим признакам и истории отказов, а отклонение от плана - по данным производственного задания. При накоплении репрезентативной истории отдельные оценки можно уточнять с помощью обучаемых моделей, однако на начальном этапе целесообразно применять объяснимые правила и статистические зависимости.

Адаптация, самообучение и диагностическая поддержка

Самообучение в промышленной роботизированной системе целесообразно ограничивать теми параметрами, изменение которых не нарушает технологическую корректность. Исследования в области самообучающихся систем управления автономными роботами показывают возможность использовать накопленный опыт для выбора поведения в изменяющейся среде [6]. В производстве аналогичный принцип может применяться для уточнения оценок времени выполнения, вероятности задержек, признаков деградации и предпочтительной очередности операций. При этом границы допустимых режимов, предельные скорости, зоны движения и межблокировки должны оставаться заранее определенными и верифицированными.

Важную роль играет качество исходных данных. Ошибочный датчик способен привести интеллектуальный алгоритм к формально оптимальному, но фактически неверному решению. Поэтому до этапа оптимизации необходимо выполнять проверку достоверности: контроль диапазона, скорость изменения, согласованность взаимосвязанных сигналов, временные метки и сравнение с альтернативными источниками. Методы интеграции сенсорной информации дают основу для повышения устойчивости оценки состояния при наличии неопределенности [9].

При внедрении интеллектуального управления необходимо сохранять понятное взаимодействие с оператором. Отечественные исследования гибких производств подчеркивают значение человекоцентричного подхода [7]. Поэтому на НМІ следует отображать не только выбранное действие, но и его основные причины: повышенный диагностический риск, изменение приоритета заказа, перераспределение загрузки или ограничение энергопотребления. Журналирование таких решений повышает объяснимость системы и позволяет корректировать веса критериев без изменения базовой программы робота.

Интеграция с существующей автоматизацией и масштабирование

Практическое внедрение интеллектуального управления целесообразно выполнять поэтапно. На первом этапе система работает в режиме наблюдения: собирает данные и рассчитывает рекомендуемое решение, но команды остаются за оператором. На втором этапе автоматизируется выбор неопасных диспетчерских действий, например, очередности заданий. На третьем этапе интеллектуальный модуль получает право формировать задания для нескольких роботов и рабочих позиций при сохранении жесткого слоя ограничений. Такой путь снижает риск внедрения и позволяет накопить достоверную статистику до перехода к более автономному режиму.

При масштабировании до нескольких ячеек центральный интеллектуальный модуль может решать задачи распределения операций, а локальные ПЛК - обеспечивать детерминированное исполнение. Концепции автоматизированного управления процессом производства робототехнических комплексов также предполагают объединение данных, моделирование и формирование планов действий на основе интеллектуального блока принятия решений [4]. Для промышленного применения данную идею целесообразно реализовывать иерархически: верхний уровень оптимизирует загрузку и очередность, а локальный уровень сохраняет независимую технологическую логику.

Таким образом, в работе предложен подход к интеллектуальному управлению роботизированной производственной системой, основанный на разделении детерминированных контуров автоматизации и верхнего уровня принятия решений. Интеллектуальный модуль использует данные ПЛК, контроллеров роботов, датчиков и производственного плана для оценки состояния, формирования допустимых вариантов действий и выбора стратегии по многокритериальному показателю. При этом технологические межблокировки и функции безопасности сохраняются независимыми от оптимизационного алгоритма.

Использованные источники:

1. ГОСТ Р 60.0.0.4-2023/ИСО 8373:2021. Роботы и робототехнические устройства. Термины и определения. — М.: Российский институт стандартизации, 2023.
2. ГОСТ Р 60.1.2.1-2016/ИСО 10218-1:2011. Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 1. Роботы. — М.: Стандартинформ, 2017.
3. ГОСТ Р 60.1.2.2-2016/ИСО 10218-2:2011. Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 2. Робототехнические системы и их интеграция. — М.: Стандартинформ, 2017.
4. Бжихатлов К. Ч., Кравченко А. Д. Концепция автоматизированной системы управления процессом производства робототехнических комплексов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — 2024. — Т. 26, № 5. — С. 13–28. — DOI: 10.35330/1991-6639-2024-26-5-13-28.
5. Граськин С. С., Ермолов И. Л., Хрипунов С. П. Концептуальные основы платформенно-модульного подхода к разработке перспективных робототехнических комплексов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2023. — Т. 24, № 12. — С. 619–626.

6. Ермолов И. Л., Хрипунов С. П. Возможный подход к созданию самообучающихся систем управления автономными роботами // Робототехника и техническая кибернетика. — 2023. — Т. 11, № 1. — С. 45–50.

7. Аристова Н. И., Чадеев В. М., Якимова О. А. Человекоцентричный подход к управлению гибкими производствами // Автоматизация в промышленности. — 2024. — № 6. — С. 25–30.