УДК 621.7 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-55-60

МЕХАТРОННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС – ОСНОВА УМНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Веригин А.Н., Ишутин А.Г., Коробчук М.В.
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург

Ключевые слова: мехатронный технологический комплекс, умное производство, химико-технологическое производство, киберфизические системы, Индустрия 4.0, цифровая трансформация.

Аннотация. В работе выполнена оценка объективного перехода мехатронного технологического комплекса от статуса самостоятельного технического объекта химико-технологического производства к статусу полноценного умного производства. Проанализирована сложившаяся, объект-ориентированная методология описания и проектирования мехатронного технологического комплекса и показана её недостаточность в условиях цифровой трансформации отрасли. Выявлена и систематизирована совокупность признаков перехода мехатронного технологического комплекса в состав умного производства. Предложены критерии как основа для последующей классификации степени интеграции конкретного технического объекта в состав умного производства. Определено место понятия умного производства в существующей общей парадигме Индустрии 4.0 и киберфизических систем. Сформулированы рекомендации по проектированию и эксплуатации мехатронного технологического комплекса с учётом перехода к умному производству, а также перспективы дальнейших исследований, включая апробацию предложенных критериев и разработку количественного индекса интеграции.

MECHATRONIC TECHNOLOGICAL COMPLEX – THE BASIS OF SMART PRODUCTION

Verigin A.N., Ishutin A.G., Korobchuk M.V.
Saint-Petersburg State Institute of Technology, Saint-Petersburg

Keywords: mechatronic technological complex, smart manufacturing, chemical and technological production, cyber-physical systems, Industry 4.0, digital transformation.

Adstract. The paper evaluates the objective transition of a mechatronic technological complex from the status of an independent technical object within a chemical and technological production facility to the status of a fully-fledged smart production facility. The existing object-oriented methodology for describing and designing a mechatronic technological complex is analysed, and its insufficiency in the context of the industry’s digital transformation is demonstrated. A set of indicators of the transition of a mechatronic technological complex into a smart production facility is identified and systematised. Criteria are proposed as a basis for the subsequent classification of the degree of integration of a specific technical object into a smart production facility. The place of the concept of smart manufacturing in the existing general paradigm of Industry 4.0 and cyber-physical systems has been defined. Recommendations for the design and operation of a mechatronic technological complex, taking into account the transition to smart manufacturing, as well as the prospects for further research, including the testing of the proposed criteria and the development of a quantitative integration index, have been formulated.

Введение

Мехатронные технологические комплексы, обычно рассматриваются как самостоятельные объекты, входящие в состав химико-технологических

производств [1-4], находятся сегодня в стадии интенсивной цифровой трансформации, определяемой общей парадигмой Индустрии 4.0 [5]. Поведение и эксплуатационные параметры мехатронного технологического комплекса (МТК) в большей степени определяются не только собственной конструкцией, но и взаимодействием с вычислительной, сенсорной, сетевой и энергетической инфраструктурой, объединяемой в рамках концепции киберфизических [6, 7] и умных производств [8]. Это делает актуальным пересмотр сложившейся методологии проектирования и описания МТК, которая не отражает наблюдаемого смещения к системному, сетевому характеру их эксплуатации.

Отдельные вопросы изменения роли человека оператора в условиях гибких, модульных процессных производств (например, переход от непосредственного управления к наблюдению и вмешательству в критических сценариях) применительно к химико-технологическому производству (ХТП) рассмотрены в работе [9]. Вместе с тем исследования, формализующие признаки, по которым фиксируется переход конкретного объекта техники в состав умного производства (УП), отсутствуют, что и определяет постановку задачи настоящего исследования.

Объектом исследования являют химико-технологические УП, объединяющие МТК с вычислительной, сенсорной, сетевой и энергетической инфраструктурой. Предметом исследования выступают процесс и закономерности его перехода от статуса самостоятельного объекта техники ХТП к статусу его элемента (узла).

Целью работы является выявление и систематизация признаков (критериев), определяющих переход МТК от статуса самостоятельного объекта техники к статусу элемента УП химико-технологического назначения.

Основная часть

Подготовленные ранее работы авторского коллектива [1-4] выполняют описание МТК по устоявшейся схеме: сначала читатель видит объект исследования – аппарат, исполнительный модуль, рабочий элемент (мешалку), блок (систему) управления и так далее. Объединяются в одну экосистему, в которой они дополняют функционал друг друга, создавая для ХТП единое удобное цифровое пространство.

Но, если смотреть внимательнее, становится ясно: МТК перестаёт существовать как объект только химического аппарата строения. Вокруг него выстраивается целый технологический контур – элементы инфраструктуры, источник энергии, электроника, алгоритмы, сенсоры, программные платформы и облачные сервисы. МТК обычно выглядит не как законченный продукт, а как узел в чём-то большом, что существует и развивается далеко за пределами объекта исследования.

Это «большое» и есть УП – интегрированная совокупность технологического (мехатронного) оборудования, вычислительных, сенсорных, сетевых и энергетических средств ХТП, объединённых цифровыми и облачными технологиями и алгоритмами обработки данных так, что поведение и параметры отдельных объектов техники определяются не только их собственной конструкцией, но и взаимодействием с этой совокупностью при эксплуатации. Именно через призму УП имеет смысл рассматривать происходящее с современным МТК.

При проектировании химического оборудования МТК больше не отделяют от поставщиков ключевых технологий. Рядом с МТК показывают решения для интеллектуального управления, цифровые модули, вычислительные платформы, сенсорные системы, решения в области энергетики и химической технологии. Такая композиция не случайна – это точное отражение новой реальности: современный МТК невозможно показать отдельно от тех, кто создаёт для него «технологию», «мозги», «нервную систему» и «память». Хороший пример такого перехода – то, как разработчики показывают себя уже не просто производителями МТК, а сборщиком УП. Условно говоря, раньше разработчики при проектировании собирали аппараты и машины из деталей. Теперь они собирают идеи из технологий партнёров и сценариев их использования: координируют работу целой сети партнёров – от промышленных площадок и поставщиков вычислительных платформ до разработчиков алгоритмов восприятия и производителей сенсоров. Роль создателей ХТП меняется фундаментально: они становятся не только производителем и задают название бренда, но и интегратором УП (рис. 1).



Рис. 1. Структура умного производства

Показательно, что за разработку МТК всё чаще отвечают не химики и технологи, а инженеры, говорящие на языке вычислений, архитектуры электронных средств и взаимодействия исходных компонентов. МТК химико-технологического назначения больше нельзя охарактеризовать только мощностью исполнительного модуля, типом перемешивающего устройства, скоростью его движения, временем непрерывной работы и объёмом его ёмкости. Теперь он характеризуется через то, как воспринимает окружающий мир (производственную среду), как принимает решения, как связан с облачной логикой, как обновляется и как работает в связке с другими объектами УП.

Когда компания начинает эксплуатировать робота-гуманоида, она демонстрирует не желание поиграть в научную фантастику, а собственные компетенции в распознавании среды, принятии решений, координации движений и обработке данных – то есть основу современной УП системы. Робот здесь становится лишь удобным средством для тренировки и проверки алгоритмов искусственного интеллекта: технология начинает тестировать себя не только в рамках конкретной УП, но и за ее пределами.

На этом фоне особенно интересно проследить, как программное обеспечение вторгается в те модули МТК, которые раньше считались почти полностью механическими. Исполнительный модуль, управление откликом на внешние воздействия – всё это становится областью, определяемой программным обеспечением. Когда МТК может синхронно и точно менять своё поведение в ответ на поток сенсорных данных, это уже не «трюк механики», а признак того, что механика постепенно подчиняется электронике и вычислительной технике: МТК начинает работать не только за счет конструкции, но и благодаря программному продукту, который в реальном времени интерпретирует происходящее и перестраивает его поведение. Именно поэтому всё чаще звучит тема software-defined the object of technology – определённого программным обеспечение МТК. Важно понимать, что за этим термином скрывается не просто возможность обновить систему управления или интерфейс экрана «по воздуху», а гораздо более глубокий перелом: МТК перестаёт быть статичным предметом, который в момент ввода в эксплуатацию уже является своей окончательной версией, а становится развивающейся платформой, способной менять свои функции, характер и уровень возможностей уже после его запуска в работу конкретного УП.

Фундаментом всей этой нового производства по-прежнему остаётся источник энергии – без него весь этот интеллект просто не на чем держать. Именно поэтому энергетический блок ощущается не как старая тема, а как критическая инфраструктура всего нового в УП: чем умнее оно становится, тем выше ее постоянная энергетическая нагрузка (вычислительные платформы, сенсоры, связь, обновления, климатические системы, цифровое управление), и это требует энергии не как вспомогательного ресурса, а как основы для функционирования.

Особенно это заметно при критических условиях эксплуатации, например при низких температурах: если раньше низкая эффективность источника энергии зимой была проблемой прежде всего для времени работы, то теперь это вопрос устойчивости всего МТК как элемента УП. Поэтому энергетические инновации сегодня нужно понимать шире, чем просто как источник энергии, а как инфраструктурный элемент системы, без которого не будет ни серьёзной вычислительной платформы, ни постоянной связности, ни настоящего перехода к определяемому программой технологическому процессу.

Из этого вырастает ещё одна ключевая мысль: химическая промышленность стремительно сходится к единому технологическому организму. Раньше МТК можно было мыслить, как набор больших независимых устройств – энергетический модуль, исполнительный модуль, аппарат, блок управления, электроника, сервис. Теперь эти устройства срастаются всё ближе: полупроводники, централизованные вычислительные платформы, системы восприятия, энергетика, облачные сервисы, цифровой интерфейс, программные обновления начинают работать как единая среда – не как набор функций, а как взаимосвязанный организм.

Это радикально меняет и сам смысл управления. Роль человека при управлении УП постепенно смещается: технолог всё чаще становится не тем, кто постоянно и напрямую управляет им, а тем, кто наблюдает, контролирует и вмешивается в редких критических сценариях. Это ещё не полная замена человека системой управления, но уже и не классическое управление в старом понимании – МТК начинает принимать на себя всё больше сложных действий, а человек всё

больше превращается в участника взаимодействия нового типа. Здесь уже недостаточно смотреть на МТК как на аппарат с интересной формой рабочего элемента: его приходится рассматривать как интерфейс между человеком, данными, энергией, промышленной инфраструктурой и облачной логикой. «МТК» как категория начинает расползаться – он уже не заканчивается на линии структуры конкретного устройства, а уходит в сеть зарядки, в облачные сервисы, в систему обновлений, в алгоритмы восприятия, в связь с химической технологией и энергетической вооружённостью УП.

Перспективы развития

Проведённый анализ практики описания, проектирования и эксплуатации МТК в контексте цифровой трансформации ХТП позволил выявить совокупность признаков, по которым фиксируется его статус самостоятельного технического объекта к статусу элемента УП: энергетическую зависимость, программную определимость поведения, изменение роли технолога-оператора, сенсорную и сетевую связность, характер жизненного цикла объекта. Систематизация этих признаков в виде критериев перехода представлена в таблице 1.

Табл. 1. Критерии перехода МТК в состав УП.

Параметр	Вне ИПС (независимый МТК)	В составе УП
Источник энергии	Независимый или автономный, оценивается по времени непрерывной работы	Инфраструктурный элемент, определяющий устойчивость всей системы
Управление	Прямое, ручное	Определяемое программой, обновляемое дистанционно
Роль технолога	Непосредственное управление	Наблюдение, контроль, вмешательство в критических сценариях
Восприятие окружающей (вне объекта) среды	Отсутствует или локально	Сенсорика, интеграция с алгоритмами анализа данных
Связь	Отсутствует	Сетевая и облачная интеграция
Жизненный цикл	Завершён на этапе ввода в эксплуатацию	Развивающийся, меняющий функции после запуска

Из таблицы следует, что переход МТК в состав УП не сводится к единичному техническому изменению, а затрагивает одновременно несколько разнородных контуров – энергетический, управленческий, кадровый и сетевой. Ни один из параметров сам по себе не является достаточным признаком перехода: например, наличие удалённых обновлений (программная определимость) без соответствующего изменения роли технолога или энергетической инфраструктуры характеризует лишь частичную, а не полную интеграцию объекта в УП. Это указывает на то, что оценка степени интеграции конкретного МТК в УП требует комплексного критерия.

Таблица 1 в её нынешнем виде – результат качественного обобщения наблюдений, изложенных в основной части статьи, а не результат эмпирической апробации на конкретных объектах; для подтверждения её применимости необходима иллюстрация на объекте из предшествующих работ авторского коллектива [1-4].

Выводы

– Существующая, объект-ориентированная методология описания и проектирования МТК не в полной мере отражает системный, сетевой характер его функционирования в составе УП.

– Переход МТК от статуса автономного объекта к статусу элемента УП фиксируется по совокупности из шести взаимосвязанных признаков (параметр источника энергии, управления, роли технолога, восприятия среды, связности, жизненного цикла), систематизированных в таблице критериев.

– Ни один из признаков в отдельности не является достаточным условием перехода – оценка степени интеграции объекта в УП требует комплексного рассмотрения всех критериев одновременно.

Заключение

В работе показано, что мехатронный технологический комплекс, традиционно рассматриваемый как самостоятельный технический объект ХТП, всё в большей степени функционирует как УП химико-технологического назначения – совокупности технологического оборудования, вычислительной, сенсорной, сетевой и энергетической инфраструктуры, определяющей поведение и параметры эксплуатации МТК наряду с его собственной конструкцией.

Список литературы

1. Веригин А.Н., Ишутин А.Г., Коробчук М.В., Мазур А.С. Мехатронный технологический комплекс как объект проектирования // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2023. – №64(90). – С. 107-115.
2. Ишутин А.Г., Веригин А.Н., Джангирян А.В. Мехатронные технологические комплексы обработки дисперсных материалов. – СПб.: Медиапапир, 2024. – 426 с.
3. Веригин А.Н., Данильчук В.С., Коробчук М.В., Саенко С.С. Мехатронные технологические комплексы перемешивания в жидких средах: учебное пособие для вузов. – СПб.: Лань, 2026. – 224 с.
4. Коробчук М.В., Веригин А.Н. Аппараты вибрационного перемешивания в жидких средах. – СПб.: Политех-Пресс, 2026. – 280 с.
5. Lasi H., Lasi H., Fettke P., Kemper H.-G., Feld T., Hoffmann M. Industry 4.0 // Business & Information Systems Engineering. 2014, vol. 6, no. 4, pp. 239-242. DOI: 10.1007/s12599-014-0334-4.
6. Monostori L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges // Procedia CIRP. 2014, vol. 17, pp. 9-13. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.115.
7. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing Letters. 2015, vol. 3, pp. 18-23. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
8. Zhong, R.Y., Xu X., Klotz E., Newman S.T. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review // Engineering. 2017, vol. 3, no. 5, pp. 616-630. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.05.015.
9. Müller R. Cognitive challenges of changeability: adjustment to system changes and transfer of knowledge in modular chemical plants // Cognition, Technology & Work. 2019, vol. 21, no. 1, pp. 113-131. DOI: 10.1007/s10111-018-0489-8.

Сведения об авторах:

Веригин Александр Николаевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой мехатронных технологических комплексов;

Ишутин Алексей Георгиевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры мехатронных технологических комплексов;

Коробчук Максим Васильевич – к.т.н., докторант.