

MES-решения нового времени



Надежда КУЦЕВИЧ,
директор департамента,
ГК «РТСофт», д. т. н.

Произошедшие перемены повлияли прежде всего на четыре фактора. Первый – комплексность MES, причем как с точки зрения расширения свойств внутренних подсистем АСОДУ (АСУ оперативно-диспетчерского управления), СМБ (системы сведения материальных балансов), ЛИМС (системы управления лабораторной информацией), СУПФ (системы управления производственными фондами) и др., так и применения новых технологий, способов разработки ПО (монолиты/микросервисы, подходы low-code, no-code). А это, в свою очередь, приводит к изменению архитектуры, включая переход от монолитной к гибридной, с возможностью разработки/обновления процессно-ориентированных модулей MES; встраиванию модулей расчета ключевых показателей KPI производства (key performance indicators – числовые показатели деятельности), моделей предиктивной аналитики, оптимизации



Алексей ХАНЫГИН,
технический директор департамента,
ГК «РТСофт»

отдельных производственных сегментов.

Второй фактор – решения в сфере импортозамещения. По всему спектру (АСОДУ, СМБ, ЛИМС, СУПФ) появились коммерческие отечественные продукты и в то же время варианты реализации на базе продуктов open source или микросервисов.

Третий фактор – обязательность применения систем информационной безопасности (кибербезопасности). Внедрение/обновление MES невозможно без учета этих рисков, особенно на фоне резкого роста числа компьютерных угроз для безопасности технологических процессов в различных отраслях.

Четвертый фактор – возможность использования онтологических моделей (ОМ) для систематизированного описания терминов определенной предметной области предприятия, их свойств и отношений между ними.

Многочисленные макроэкономические и политические изменения сопровождались уходом с российского рынка многих западных разработчиков MES-систем (Manufacturing execution system – система управления производственными процессами или АСУ ПП), трендом на импортозамещение, ставшим стратегическим после издания Указа Президента РФ от 30.03.2022 № 166, а также цифровой трансформацией, которая продолжает корректировать направления развития программных инструментов и подходы к созданию и обновлению систем управления производством. Внешние обстоятельства оказали влияние в первую очередь на комплексность самой MES и ряд других факторов. Рассмотрим, каких именно.

Их полезность не оспаривается, но пока не входит в перечень приоритетных задач.

Остановимся на выделенных аспектах создания/обновления именно MES-решений.

Гибридные технологии

Пока использование монолитов наиболее оправдано для процессов нижних уровней, включая системы управления производством MES, которые управляются в режиме реального времени [1].

Политика постоянных улучшений работы предприятия требует непрерывной оптимизации процессов, благодаря чему расширяется область применения микросервисного подхода, ресурсно более доступного по сравнению с монолитами. Микросервисы более избирательно масштабируют обработку больших данных в отношении самого требовательного к вычислительным ресурсам приложения и могут быть быстро перестроены при появлении новых объектов или задач управления каждого модуля АСУ.

Технология легко тиражируется: появилась возможность упаковывать прикладное ПО в так называемый контейнер и передать на тот сервер, где оно будет развернуто в том виде, в каком его собрал разработчик. Приложение сохранит целостность и будет корректно работать на любом устройстве [2]. Вместе с приложением в контейнер упаковываются и микросервисы, чтобы не переносить их отдельно из рабочей среды АСУ. Часто контейнер и представляет собой готовый микросервис. В современных исследованиях [3, 4] подчеркивается востребованность предиктивных методов управления производством, которые реализуются на базе микросервисов и позволяют моделировать трудно измеряемые или не измеряемые технологические данные, а также предсказывать сбои в работе оборудования и формировать перечень мер по их предотвращению, поддерживать процесс в режиме энергосбережения [5].

Следует отметить, что изменяющиеся процессы со временем могут превращаться в устоявшиеся, в этих случаях целесообразно превращать микросервис в составную часть монолитной цифровой платформы (рис. 1).

Цветом и цифрами выделены на рис. 1 функциональные области с основными компонентами: 1 – сервис аутентификации и авторизации;

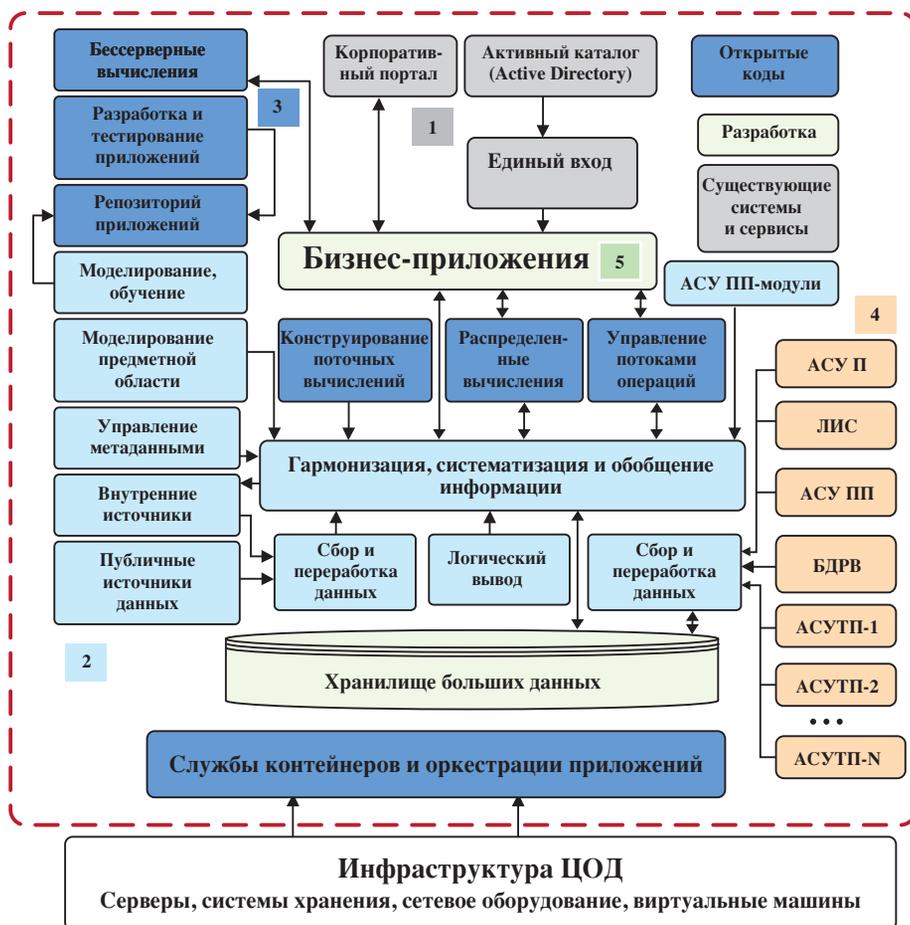


Рис. 1. Обобщенная блок-схема гибридной цифровой платформы

- 2 – гармонизация, систематизация, управление метаданными и инструменты моделирования предметной области;
- 3 – инструменты для разработки;
- 4 – монолитные системы;
- 5 – средства виртуализации, включая управление гипервизором для встраивания модулей и моделей.

В блок-схеме архитектуры с функцией гибридной цифровой платформы обработки больших данных (рис. 1) невозможно отразить все взаимосвязи, но основная идея состоит в множественном взаимодействии монолитных приложений различных уровней автоматизации предприятия (область 4) с функциями микросервисных приложений (области 1–3), в том числе

посредством различных средств виртуализации (область 5). Микросервисы, в отличие от монолитных приложений, подразделяются не по месту в иерархии систем автоматизации, а по функциональному содержанию. Анализ архитектуры позволяет определить области применения микросервисов и их взаимодействие с монолитами для:

- интеграции микросервисов в традиционные (монолитные) приложения;
- построения облачных и распределенных цифровых платформ, контейнерных приложений с использованием компонентов с открытым кодом¹;
- предоставления сервиса «Платформа как услуга»² и возможности развертывания

¹ Open-Source.

² Platform as a Service (PaaS) означает аренду инструментов для разработки и запуска приложений.

³ Гипервизор – монитор виртуальных машин или программно-аппаратная схема, обеспечивающая возможность параллельного выполнения нескольких ОС и управления ресурсами на одном хост-компьютере при изолированности ОС.

Показатели KPI, относящиеся к производству	Показатели KPI, относящиеся к качеству
Показатели KPI, относящиеся к активам	Показатели KPI по результативности

Рис. 2. Типы показателей KPI

инструментальных средств на собственной инфраструктуре;

- развертывания новых и/или миграции виртуальных машин в единую платформу с гипервизорным³ управлением [2].

Применять гибридную цифровую архитектуру в непрерывных отраслях промышленности рекомендуется по мере роста количества моделей, оптимизационных модулей, которые используют результаты работы микросервиса как источника данных для работы монолитных систем и наоборот.

Ключевые показатели производства (KPI)

Есть два основных пути совершенствования производства: повышение его эффективности (оптимизация времени, фондов, ресурсов и денег) и увеличение результативности (качества) за счет более точного соответствия спецификации заказчика.

Выбор измеряемых показателей KPI варьируется в зависимости от характера бизнеса и результативности улучшений. Но для сбалансированного представления о квадрате производства, как и о предприятии в целом, важно следить за целым рядом показателей. Сбалансированное видение может обеспечиваться, например, сочетанием ключевых показателей результативности, имеющих отношение не только к производству, но и к активам и качеству (рис. 2).

Следует отметить, что именно KPI позволяют оценить результативность оптимизации процессов, повышения эффективности.

В нашем примере «производственные» KPI несут в себе информацию об объеме продукции и ее количестве, изготовляемом в единицу времени. Так, в структуре OEE (Overall Equipment Effectiveness – общая эффективность оборудования) содержится методика анализа. В результате

анализа устанавливается причина снижения эффективности, на которой требуется сфокусировать внимание. OEE позволяет выявить потери и причины неэффективности работы, а также проследить влияние текущей производительности отдельной единицы оборудования на эффективность производства в целом. На основе данных OEE делается вывод, возможно ли повышение производительности на существующем оборудовании или его потенциал исчерпан.

По данным исследований, лучшие мировые производители достигают уровня производственного процесса с показателями OEE выше 85%. Значения основных показателей в случае достижения этого значения приведены в таблице 1. Эти данные актуальны для непрерывных производств. Для дискретных производств аналогичный показатель OEE равен 80%.

Отметим, что для многих предприятий значение показателя качества превосходит указанное в таблице 1. Однако среднее значение показателя OEE для производителей не превышает 60%. Данный факт указывает на потенциальные возможности оптимизации производства в области производительности и доступности.

Анализ показателей OEE [<https://trim.ru/informacionnye-sistemy/sistema-monitoringa-pokazateley-oee>] –

отправная точка решения проблем потери эффективности. В процессе наблюдения сравнивают показатель OEE с целевым значением. Если разница ощутимая, необходимо искать причины. Закономерный вопрос – с чем сравнивать. Приведенные выше показатели мировых производителей подходят для стратегических целей, но для оперативного управления лучше использовать показатели, отражающие специфику конкретного производства.

Для текущего состояния производства можно рассчитать значение OEE, с которым в будущем стоит проводить сравнение для оценки сделанных улучшений, в том числе для отдельных производственных линий. Можно сравнивать работу с аналогичным периодом времени в прошлом, что важно для сезонных производств.

Враг, с которым ведется борьба. Одна из основных целей OEE – снижение шести наиболее значительных причин потери эффективности (Six Big Losses), перечисленных в таблице 2.

Управление простоями оборудования. Задача управления простоями сводится

Таблица 1. Значение показателей OEE лучших мировых производителей

Показатель	Значение
Доступность	90%
Производительность	95%
Качество	99.9%
OEE	85.4%

Таблица 2. Шесть причин потерь

Причина	Категория	Примечание
Поломка	Потери из-за простоев	Существует определенная свобода в том, что относить к поломкам
Настройка	Потери из-за простоев	Включает смену и перенастройку инструментов
Мини-остановка	Потеря скорости	Обычно включает остановки на время меньше, например 5 минут
Снижение скорости	Потеря скорости	Все, что не позволяет процессу работать на максимально возможной скорости
Брак при запуске	Потеря качества	Брак, возникающий при прогреве, запуске и на прочих ранних стадиях производства
Брак при производстве	Потеря качества	Брак, возникающий при обычной работе производства

к нахождению промежутков времени, когда оборудование не работало или работало с пониженной скоростью или качеством, и классификации этих промежутков согласно модели времени и дерева причин. Затем периоды времени агрегируются для каждой категории. В результате получают статистические показатели, которые используются при расчете KPI.

Модель времени содержит набор категорий времени, согласно которым простои и потери могут быть сгруппированы, например, нерабочее время, плановый и неплановый простои, потери скорости и качества и т. д. При расчете KPI учитываются также категории времени, в частности, календарное, плановое, рабочее время, время работы с максимальной скоростью, идеальное время. Приведенную модель можно расширить дополнительными категориями.

Дерево причин представляет собой детализацию категорий времени и позволяет классифицировать причины простоев. Например, для непланового останова можно указать, что он может быть вызван ручной остановкой оборудования, ожиданием (материалов или персонала) либо поломкой. В свою очередь ручная остановка оборудования может быть обусловлена перенастройкой, регулировкой и т. п. В результате последовательной детализации и оформляется дерево причин. В дальнейшем простои систематизируются по группам согласно узлам дерева.

Подход OEE и системы управления простоями относятся к системам класса MES. Информационная среда позволяет соотнести показатели эффективности с другими показателями. О работе оборудования формируются отчеты. Также возможна рассылка отчетов по электронной почте. Тем самым облегчается доступ к данным, не нужно ждать подготовки отчета в ручном режиме, достаточно настроить систему рассылки, чтобы получать отчет, например, утром каждого дня.

Таким образом, система OEE интегрируется в информационную среду MES. Как быть, если до внедрения OEE на предприятии MES не было? Варианта два: использовать автономное решение для анализа эффективности работы оборудования либо начать внедрение MES с создания информационной среды и построения системы OEE на ее основе.

Предиктивные модели как инструмент повышения эффективности

Прогнозная или предиктивная аналитика представляет интерес благодаря достижениям в области больших данных, машинного обучения [4]. Способность предсказывать будущие результаты, события, тенденции может иметь решающее значение во многих отраслях промышленности. Наличие большого объема технологических и производственных данных с их правильной интерпретацией, определением вероятности будущих событий и результатов позволяет выявить скрытые возможности предприятия, управлять рисками, влиять на стратегию развития бизнеса и принимать оптимальные бизнес-решения.

Среди экономических мер по ресурсосбережению следует выделить формирование прогнозов по целевым показателям, в том числе в ответ на принятые меры.

Прогнозная аналитика начинается с бизнес-целей

промышленного предприятия по сокращению потерь, экономии времени, уменьшению затрат, например:

- повышение эффективности производства с использованием лучшего опыта в виде эталонных профилей удельных энергозатрат [5, 6];
- повышение ситуационной осведомленности в масштабах всего предприятия в части контроля редко измеряемых или трудно измеряемых технологических параметров, моделируемых на основе прямых и косвенных данных АСУ ТП с оперативным предоставлением целевой информации по назначению [7, 8];
- оптимизация стратегий технического обслуживания, сокращение незапланированных простоев с помощью предиктивных систем, обеспечивающих раннее предупреждение об отклонениях в работе оборудования [9, 10].

Важным техническим условием функционирования ПС является наличие бесперебойного и непрерывного потока данных АСУ ТП, которые интегрируются с накопленной информацией об операциях и затем используются для получения новых сведений о производстве в целом для прогнозирования новых решений.

Процесс формирования расчетных моделей для технологического процесса (рис. 3) включает следующие этапы:

- формирование массива данных целевых показателей с целью обучения для конкретного технологического объекта;



Рис. 3. Предиктивная система. Модель обрабатывает на входе измеряемые технологические данные и выдает целевые показатели

- формирование перечня исторических входных технологических данных;
- определение значимых входных параметров;
- согласование данных;
- формирование и обучение модели.

В качестве базы для формирования обучающих выборок используются исторические (архивные данные) о процессе, для которого строятся расчетные модели. Данные обучающих выборок приводятся к определенному формату и качеству. Данные в выборках должны быть согласованы.

Для каждого целевого показателя определяется набор значащих входных параметров АСУ ТП выбранной технологической установки, которые нужны для создания и обучения расчетной модели. Таким образом формируются наборы данных (дата-сет) входных параметров и наборы целевых (выходных) параметров. Для проверки входных и целевых данных предварительно выполняются следующие операции:

- первоначальная статистическая проверка (рассеивание, распределение входных и целевых показателей), например, методом Шапиро-Уилка (критерий нормального распределения). Затем можно применять проверки равенства дисперсий двух выборок по Фишеру;
- проверка вероятности того, что рассматриваемые параметры с данным распределением Фишера превысят значение статистики. Если значение статистики ниже уровня значимости, нулевая гипотеза отвергается. Опровержение нулевой гипотезы позволяет предположить, что связи между входными и выходными данными нет, следовательно, такая выборка при построении модели не рассматривается;
- вычисление взаимной корреляции между входными переменными. Стандартный метод оценки степени корреляции/сходства двух последовательностей входных параметров только по форме сигнала.

Следующий этап – формирование и обучение модели, для чего используется согласованный набор входных и целевых выборок (измеренные данные АСУ ТП).

В процессе обучения на основе прецедентов (с учителем) выявляются скрытые взаимосвязи входных и целевых показателей, позволяющих восстанавливать целевые показатели на новых (тестовых) данных. После обучения выводятся результаты проверки моделей по метрикам качества. Часто это RSME – квадратный корень от средней квадратичной ошибки, MAE – средняя абсолютная ошибка, CUSUM – кумулятивная сумма.

В результате формируется несколько типов моделей, обученных на различных алгоритмах. Самые популярные из них:

- линейная регрессия МНК (метод наименьших квадратов), когда сумма квадратов отклонений экспериментальных точек от кривой, т. е. $[y_i - f(x_i)]^2$, наименьшая;
- K – ближайших соседей (kNN). Это метрический алгоритм для автоматической классификации объектов или регрессии. Объект относится к тому классу, который наиболее распространен среди k соседей данного элемента, классы которых известны;
- опорная векторная регрессия (SVR) с основной идеей перевода исходных векторов в пространство более высокой размерности и поиск разделяющей гиперплоскости с наибольшим зазором в этом пространстве.

После проверки обученной модели на тестовых данных ее

можно вводить в эксплуатацию без измерения целевых параметров, но с оценкой точности измерения целевых параметров в оперативном режиме и с периодическими поверочными процедурами, подтверждающими качество функционирования модели.

Данный подход применяется зачастую для расчета:

- редко измеряемых или неизмеряемых технологических параметров, когда существует зависимость между измеряемыми технологическими параметрами и набором зависимых целевых показателей, которые не измеряются. Опыты разработки с виртуальными анализаторами, по сути ПС, публикуются часто [3, 4, 5];
- энергоэффективности. При наличии зависимости удельных энергозатрат от значения входных параметров пространство входных параметров разбивается на области, внутри которых условия находятся минимальный в части энергопотребления период, который будет эталоном. В такую систему включается визуализация с удобным графическим интерфейсом рекомендуемого профиля и значимыми (рис. 4).

Другой метод классификации объектов на однородные группы, кластеры используется для раннего обнаружения отклонений

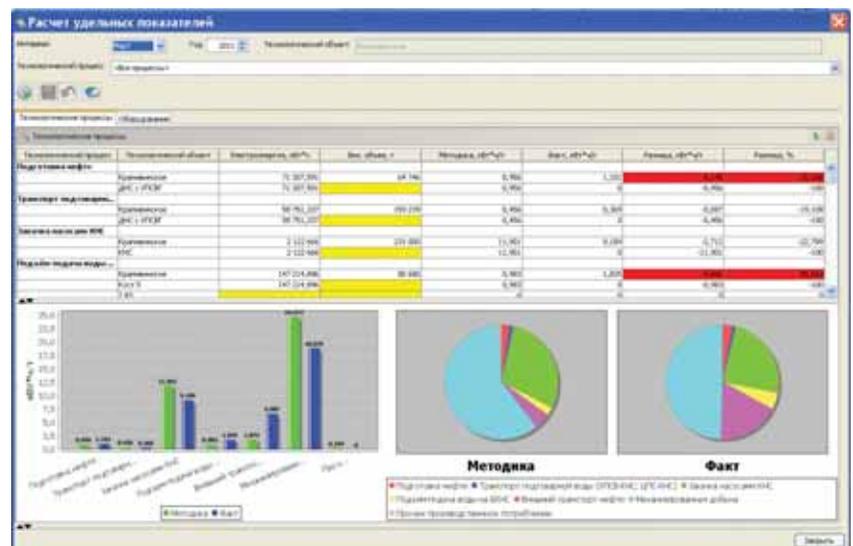


Рис. 4. Расчет удельных показателей по технологическим переделам

в работе оборудования. Наряду с построением предиктивной модели состояния оборудования это позволит уменьшить количество простоев оборудования и повысить эффективность его работы, снизить эксплуатационные и капитальные затраты на обслуживание.

Для построения предиктивной модели используется большой объем исторических данных с датчиков, описывающих нормальный режим работы оборудования. На их основе формируется статистическая модель или «цифровой портрет» нормального режима работы, с которым сравниваются данные работающего оборудования (рис. 5).

Построенная модель управляется данными (Data driven) и не зависит от физических свойств оборудования. Но алгоритмы распознавания обнаруживают отклонения в поведении оборудования в реальном времени.

Онтологический подход к созданию комплексных MES

Современный подход к созданию автоматизированных систем предполагает этап внедрения, на котором для уже разработанной системы подготавливается регламент работы с ней, согласующийся с особенностями конкретной организации. В свою очередь, это приводит к доработкам системы и обновлению существующего регламента. Учитывая то, что доработки могут оказаться трудоемкими, но необходимыми для использования системы, время прохождения этапа внедрения может значительно увеличиться.

Для решения этой проблемы применяются различные методики, в том числе онтологический подход (рис. 6), благодаря которому возможно добавление новых знаний во внедряемую автоматизированную систему без ее перепрограммирования, что существенно снижает сроки внедрения.

Достаточно подробный обзор технических аспектов использования онтологий рассматривается для:

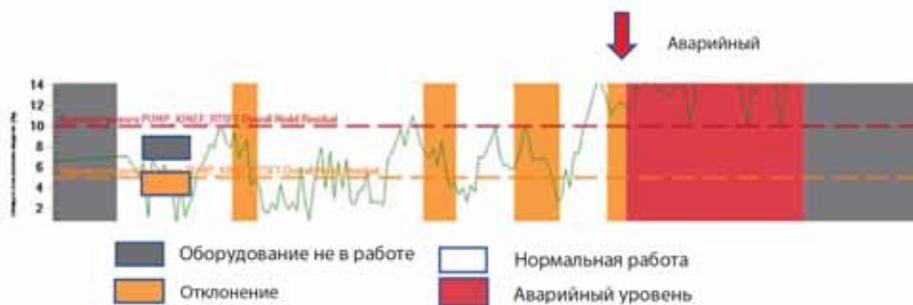


Рис. 5. Модель процесса, отслеживающая потоки температуры, давления и т. д. Кривая на рисунке в качестве примера отражает температуру

- MDM-систем (Master Data Management – управление основными данными) для обновления классификаторов и справочников, например, в системах технического обслуживания и ремонта;
- создания/актуализации отраслевых стандартов (например, CIM «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Информационная модель электроэнергетики»), разрабатываемых на основе МЭК 61970 и МЭК 61968 (применяются в электроэнергетике и реализованы в виде OM);
- актуализации стандартов предприятия, инструкции по охране труда, технике безопасности и пр.

Широко распространены такие инструментальные средства создания OM, как open source, например, Protégé v.5.2 разработки Stanford Center.

Система (подсистема) обеспечения информационной безопасности (кибербезопасности)

Разработка технологически независимых и доверенных

систем управления производством – актуальная задача национального уровня, решение которой предусматривает сочетание компьютерной и промышленной безопасности.

Ландшафт угроз кибербезопасности включает в себя техногенные (датчики и исполнительные механизмы, программируемые логические контроллеры, оборудование управления сетями, серверное оборудование, клиентские устройства, устройства коллективного пользования, устройства ввода и т. п.) и антропогенные (человеческий) факторы как наиболее непредсказуемые угрозы. К другим компонентам кибербезопасности относятся уязвимости и методы их исследования, а также возможности и методы атак на системы управления производством.

Методы защиты систем управления производственными процессами (MES) от целевых атак разнообразны. Среди условий эффективности защиты эксперты отмечают разработку моделей защиты объекта автоматизации на каждом этапе ЖЦ, выбор соответствующих подходов к защите компонентов MES и определение степени защиты всех компонентов системы. При этом следует оценивать возможность повышения

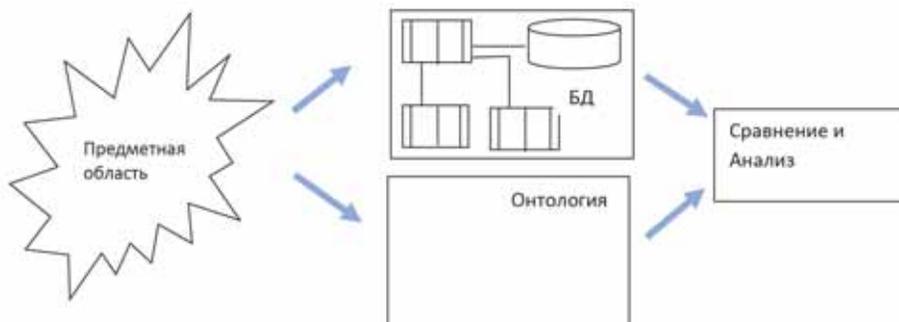


Рис. 6. Описание множества объектов и связей

степени защиты на этапах ЖЦ, где потенциальная атака может нанести значительный урон.

Особое внимание необходимо уделять защите компонентов MES на изменение конфигурации, для этого можно применять методы доверенной загрузки компонентов. MES, как правило, – распределенная система, которая отличается рядом преимуществ перед централизованными системами с точки зрения защиты. Эту особенность следует использовать при проектировании и выборе средств и методов защиты MES.

Как показывает практика, целесообразно комбинировать наложенные и встроенные средства защиты. Встроенным средствам защиты отдают предпочтение в случае проектирования систем управления производством на вновь создаваемых производственных объектах. При модернизации существующих MES в приоритете наложенные средства защиты информации. Средства защиты сетевой инфраструктуры и конечных узлов принято интегрировать с подсистемой диагностики технологической системы (системы автоматизации). Применение средств криптографической защиты информации (СКЗИ) оправдано при использовании публичных (общих) каналов связи.

Выводы

Аналитические материалы и семинары бывших партнеров – западных компаний – подтверждают аналогичные подходы к совершенствованию систем управления производством в металлургической, горнодобывающей, нефтегазовой и других отраслях. Новые концепции предусматривают использование производственных данных для принятия решений и повышения эффективности, непрерывное операционное совершенствование с AVEVA UOC's (Unified Operator Center – единый центр) и управление отчетностью с множества объектов на базе одной диспетчерской (<https://industrial-software.com/solutions/aveva-unified-operations-center/>). Большое внимание уделяется промышленным сетям

и кибербезопасности (например, от Belden). Основной вектор их развития – применение монолитов с предиктивной аналитикой в микросервисах, т. е. в гибридных решениях.

Предиктивные модели как инструмент повышения энерго- и ресурсоэффективности показывают хорошие результаты, но при соблюдении ряда условий. Важен набор исторических данных (дата-сет), на основе которых модель может быть создана, и оперативный набор для прогнозов. Процедура создания моделей предусматривает следующие этапы: разработка пилотного проекта Proof of Concept (POC – проверка концепции); формирование MVP (Minimum Viable Product – минимально жизнеспособного продукта) – версии реализации идеи с минимальным набором функций; выход на тиражируемый вариант MLP (Minimum Lovable Product – минимально привлекательного продукта) – первичной версии продукта, которая нравится пользователям. Соблюдение апробированной технологии – еще одно условие создания качественных прогнозных моделей. ■

Литература

1. *Reference Architecture Model, Version 3, 2019. International Data Spaces Association. Germany. URL: <https://internationaldataspaces.org/wp-content/uploads/IDS-Reference-Architecture-Model-3.0-2019.pdf> (дата обращения 11.04.2024).*
2. Розенблюм М., Гарфинкель Т. Мониторы виртуальных машин: современность и тенденции // *Открытые системы*. 2005. № 6. 12 с. <http://www.osp.ru/os/2005/05-06/185589/> (дата обращения 11.04.2023).
3. Брускин С.Н. Модели и инструменты предиктивной аналитики для цифровой корпорации / *Математические и инструментальные методы* // *Вестник РЭУ им. Г.В. Плеханова* – 2017. – № 5. С. 135–139.
4. Носырева А.А., Абрамов В.И. *Предиктивная аналитика – основа для цифровой*

трансформации компаний / Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ // Сборник научных статей Международной научно-практической конференции. Актуальные проблемы экономики, учета, аудита и анализа в современных условиях. – Курск. – 2021. С. 179–182.

5. Целиканов Д. (ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»), Утешев К. (АО «РТСофт») *Программный комплекс «Платформа энергоменеджмента» ПАО «ММК», Автоматизация в промышленности*. 2020. № 2. С. 12–15.
6. Антомошкин А.Ю. *Опыт внедрения системы энергоменеджмента по методологии ЮНИДО в России // Литье и металлургия*. 2017. № 4.
7. Шумихин А.Г., Зорин М.П., Немтин А.М., Плохов В.Г. *Опыт разработки системы виртуального анализа показателей качества продуктов установок каталитического риформинга бензиновых фракций и системы их подстройки в режиме реального времени. Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*. 2017. № 2.
8. Тугашова Л.Г. *Виртуальные анализаторы показателей качества процесса ректификации. «Автоматизация и информационные технологии» Альметьевского государственного нефтяного института, Electrical and data processing facilities and systems*, № 3. v.9. 2013.
9. Владов Р.А., Дозорцев В.М., Шайдуллин Р.А., Белоусов О.Ю. *Предиктивная аналитика состояния оборудования в химико-технологических процессах. «Автоматизация в промышленности»*. 2019. № 12. С. 44–52.
10. Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Алешина А.А., Кравцов Ю.А. *Информационно-математическая система раннего предупреждения об аварийной ситуации. Механика и машиностроение «Известия Самарского научного центра РАН»*. Т. 15. № 4 (4). 2013. С. 919–923.