

Вадим Подольный

Цифровые двойники производства для
моделирования, управления и совершенствования
технологических процессов

Вадим Подольный

Технический директор, Лаборатория Технологий Автоматизации

Руководитель комитета промышленной автоматизации,
АРПП «Отечественный софт»

Что такое цифровой двойник с точки зрения АСУ

A decorative graphic consisting of several overlapping, wavy, light blue lines that span the width of the slide, positioned below the main text.

Цифровой двойник

Что такое цифровой двойник?

- Максимально детальное описание производства

Сразу возникают вопросы

- Зачем описывать (цель)
- Как описывать (методология)
- Чем описывать (средства)

Цифровой двойник технологических процессов

ЦД ТП как правило состоит из нескольких разнообразных моделей

- Модель конструктивная (геометрия, материалы, компоненты)
- Модель математическая (с помощью какого аппарата можно описать физику)
- Модель физическая (описание и моделирование состояний)

Цифровой двойник технологических процессов

Конструктивная модель

- Геометрия – 3D модель
- Конструктив – BIM модель (Building Information Model)
- Компоненты – CIM модель (Common Information Model)

Цифровой двойник технологических процессов

Математические модели технологических процессов

- Математическая модель физического процесса (методики расчета)
- Модель аппроксимационная (упрощение сложных методик)
- Модель статистическая (не понимая физику процесса, можно набрать статистику)
- Модель ИИ (доверить наблюдения и выводы машинному обучению)

Цифровой двойник технологических процессов

Физические модели технологических процессов

- Модель прочностная (сопромат) FEA, CFD
- Модель тепломассопереноса, гидро(аэро)динамическая FEA, CFD
- Модель химическая (радиохимическая) FEA, CFD
- Модель кинетическая (движение частиц) MC

Устройство управления технологическим процессом

Как устроено управление технологическим процессом

- АСУ ТП управляет производством в целом, систем может быть множество
- АСУ ТП интегрирует множество локальных САУ сложных комплексов, устройств
- САУ таких комплексов как правило поставляется производителем
- Такой производитель знает все о физике своих комплексов
- Как ему кажется, пока не бахнет

Цифровой двойник АСУ технологического процесса

Что мы хотим получить с помощью ЦД ТП

- Смоделировать логику управления ТП и апробировать ее на ЦД
- Выявить возможности оптимизации ТП и логики управления им на ЦД
- Повысить осведомленность о характере протекания реального ТП
- Выявить возможности оптимизации ТП и логики управления им в реальном ТП
- Выявить возможности доавтоматизации (гиперавтоматизации) ТП

Модель данных АСУ ТП

Что обычно хранится в модели данных АСУ ТП

- Данные о комплексах и установках (для описания в SCADA / MES)
- Данные о контроллерах (точки сопряжения)
- Схематичное представление (мнемосхемы, виджеты, диаграммы)
- Алгоритмы управления (конфигурации, уставки)
- Алгоритмы ПАЗ

Что такое предиктивная аналитика
Системы предиктивной аналитики (СПА)
Решения на базе СПА

The bottom half of the slide features a decorative graphic consisting of several overlapping, wavy, light blue lines that create a sense of movement and depth against the dark blue background.

Предиктивная аналитика

Виды предиктивной аналитики

- Модели на основе физики
- Статистические модели
- Машинное обучение
- Гибридные модели

Предиктивная аналитика

Алгоритм работы предиктивной аналитики

- Берутся данные из АСУ ТП
- Применяется выбранная модель
- Модель сигнализирует о состоянии, иногда обратно в АСУ ТП
- Реализуется как СППР
- Оператор на основании данных из СППР принимает решения

Предиктивная аналитика

Что выявляет предиктивная аналитика

- Деграцию узлов оборудования
- Нетипичное поведение оборудования, отклонение от ожидаемого
- Классификация неисправностей, выявление характерных паттернов
- Прогнозирование отказов
- Прогнозирование аварий

Предиктивная модель

Как применять предиктивные модели в АСУ ТП

- Физические модели чрезвычайно сложные и медленные
- Требуют колоссальных аппаратных ресурсов
- Ставить АСУ ТП в зависимость от такой инфраструктуры очень опасно
- Необходимо упрощать предиктивные модели
- Такие модели могут быть быстрее режима реального времени

Предиктивная модель

Как применять предиктивные модели в АСУ ТП

- Нужно учитывать период прогнозирования (секунды, минуты, часы)
- Нужно учитывать допустимую нарастающую ошибку расхождения результатов
- Нужно упрощать модель максимально уменьшив нарастание ошибки

Предиктивная модель

Статистические модели

- Статистические модели самые простые
- Имеет очень ограниченный диапазон применения
- Подходит для эффективной диагностики отклонений ожидаемого поведения
- Требуют описания паттернов (например, нормального поведения)
- Требует эффективных алгоритмов выявления паттернов
- Может работать в режиме РВ и в режиме аналитики архива

Предиктивная модель

Статистические модели – основные методы используемые для реализации

- Регрессионный анализ (сравнение с эталоном, выявление отклонений)
- Гармонический анализ (разложение на частоты)
- Корреляционный анализ (оценка взаимовлияния параметров)
- Дифференциальный анализ (выявление динамических изменений)
- Data mining (поиск закономерностей)
- Сигнатурный анализ (выявление паттернов)

Предиктивная модель

Статистические модели – распространенные встречающиеся модели

- Множество регрессионных моделей
- SBM – Similarity Based Modeling (корреляционная)
- MSET – Multivariate State Estimation Technique (метод T^2 карт Хотеллинга)
- Модели на основе AI и ML (нейросети, нечеткая логика, генетические алгоритмы)

Знание физики ТП всегда улучшит любую статистическую модель

Предиктивная модель

Математические модели

- Подобрать необходимый математический аппарат
- «Натянуть» эту математику на железо
- Обеспечить эффективность
- Обеспечить точность
- Верифицировать, валидировать

Предиктивная модель

Физические модели

- Различные техпроцессы описываются известными моделями
- Гидродинамика – ур. неразрывности, Навье-Стокса хорошо считаются FEA, CFD
- Прочность – механические модели, хорошо считаются FEA, CFD
- Химия – химические модели, хорошо считаются FEA, CFD

Предиктивная модель

Физические модели – методы упрощения моделей

- Применение упрощенных моделей, описывающих физику техпроцесса
- Увеличение пространственно-временной сетки
- Применение машинного обучения для снижения нарастания ошибки
- Упрощение и оптимизация результирующей предиктивной модели
- Такие модели могут быть быстрее режима реального времени

Практика

A decorative graphic consisting of several overlapping, wavy, light blue lines that create a sense of movement and depth, positioned horizontally across the middle of the page.

Доступные вычислительные пакеты

Виды вычислительного ПО

- Платформы символьных вычислений
- FEA CFD модули для платформ символьных вычислений
- Специализированные FEA CFD вычислительные пакеты
- Специализированные FEA CFD вычислительные пакеты на основе СПО
- Симуляционные модули для сред символьных вычислений
- Специализированные симуляционные платформы

Доступные вычислительные пакеты

Лидеры мирового рынка вычислительной физики

- Wolfram Mathematica, символьные вычисления
- 3D Transient Fluid Flow, CFD модуль на языке Wolfram
- Matlab, символьные вычисления
- QuickerSim CFD Toolbox for MATLAB

Доступные вычислительные пакеты

Лидеры мирового рынка вычислительной физики

- Adapco STAR-CCM, CFD
- Ansys Fluent, CFD
- COMSOL Multiphysics, CFD
- Siemens SimCenter, CFD
- SimScale, CFD

Доступные вычислительные пакеты

Лидеры мирового рынка вычислительной физики - СПО

– OpenFOAM, CFD

– Relap, CFD

Доступные вычислительные пакеты

Лидеры рынка симуляторов

- SimInTech, Россия !!!
- Matlab Simulink
- Wolfram SystemModeler
- GNU Octave, СПО

Системы усовершенствованного управления (СУУ)

Системы предиктивной аналитики (СПА)

Системы предиктивного управления (СПУ)

Система Усовершенствованного Управления – СУУ ТП

Для хорошо изученных ТП, существуют оптимизирующие АСУ ТП

Таким система свойственно:

- Строится только на базе РСУ Поддерживать ФГУ
- Управление плавающими уставками регуляторов
- Выявление первопричины каскада событий / тревог
- Снижение нагрузки на оператора
- Повышение безопасности производства

Рынок СУУ, СПА

Лидеры мирового рынка в состав своих решений включают инструменты (СУУ, СПА)

- Honeywell APC, есть инструменты Asset Performance Management (APM)
- Yokogawa APC, Predictive Detection Tool
- Siemens APC, SPPA-D3000 Plant Monitor
- Schneider Electric AVEVA APC, PRiSM Predictive Asset Analytics
- ABB APC, ABB Ability Genix
- General Electric APC, GE SmartSignal

Российский рынок СУУ ТП

Российские вендоры решений в области СУУ ТП

- Advanced Robust Control, Proptimize
- SmartGranum, Моделирование и цифровые двойники (название компании)
- APC, Т-Софт

Докладчик не видел данных решений в бою

Докладчик считает, что APC без собственной SCADA – это примитивщина

Российский рынок систем предиктивной аналитики

Российские вендоры решений в области предиктивной аналитики

- Прана – Ренова (метод MSET)
- Cyber Studio – Сайбер физикс (метод MSET)
- SmartMaintenance – Clover Group (регрессионный метод)

Российский рынок систем предиктивной аналитики

Что позволяет анализировать MSET

- Вращательные механизмы (турбины, двигатели, подшипники)
- Вибрация (станки, сложные механические механизмы)

Предиктивное управление

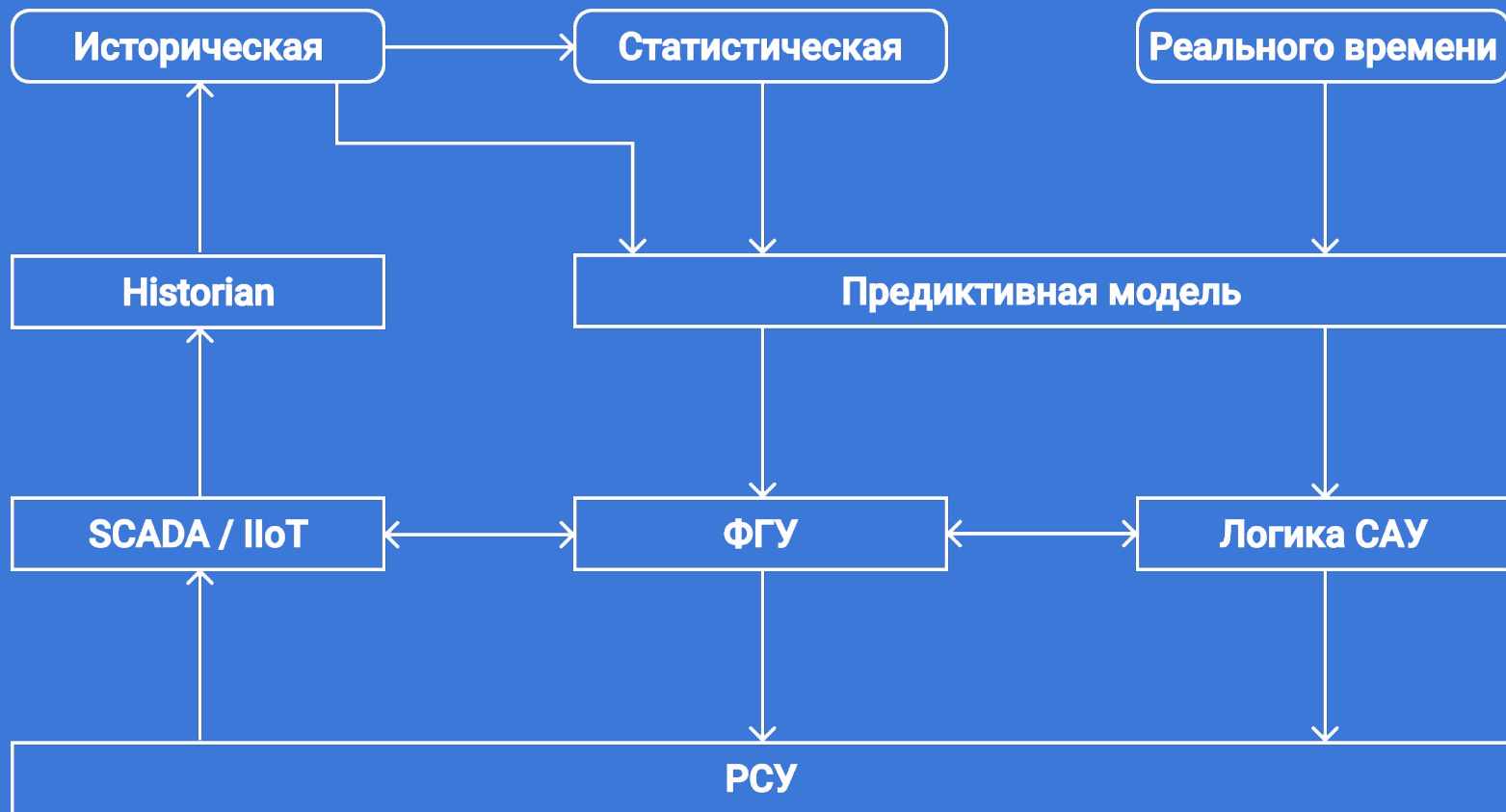
Как осуществляется предиктивное управление

- В алгоритмах управления используются данные предиктивной аналитики

Выделяют

- Автоматизированное предиктивное управление (участвует оператор)
- Автоматическое предиктивное управление (наблюдает оператор)
- Автономное предиктивное управление (без оператора)

Предиктивное управление



Предиктивное управление

Предиктивные управляющие модели разделяют по времени реакции

- Влияет на мгновенное управление
- Результаты отложенных вычислений влияют на управление
- Предсказывают близкие события
- Предсказывают отложенные события

Предиктивное управление

Предиктивное управление может быть использовано в разнообразных целях:

- Бережливое использование оборудования (не ремонтировать)
- Продление срока службы оборудования (дотянуть до ППР)
- Работа оборудования на износ (максимальный результат)
- Эффективная балансировка работы оборудования дискретных производств

Российский опыт применения СПА, СПУ

В РФ накоплен значительный опыт разработки СПА, СПУ для внутреннего использования

- Прежде всего, РОСАТОМ в рамках АСУ ТП АЭС
- Тепловые генерирующие компании – ИнтерРАО, Т-Плюс
- Машиностроение, например – Силовые машины, Ротек
- Переработка сырья, НПЗ – Газпромнефть, Роснефть, Татнефть
- Металлургия, сталелитейные заводы, обрабатывающие производства

Мощный пример – СПУ ЯЭУ ВВЭР-1000

Задача – повысить эффективность управления мощностью реактора

Данные из АСУ ТП – SCADA + Historian

Диффузионное уравнение кинетики нейтронов

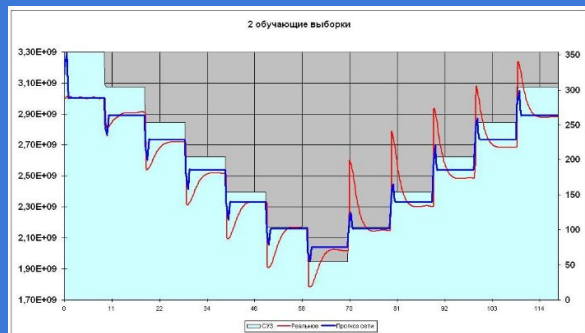
Уравнение Навье-Стокса для тепломассопереноса

Подружить их во времени

Берем такую xyz_t сетку, чтобы можно было быстро посчитать

Обучаем простую рекуррентную нейросеть модель на данных из Historian

Применяем нейросетевую модель к результату физического расчета



Возможности рынка РФ для разработки серьезных СУУ, СПА, СПУ

На чем можно и нужно строить СУУ, СПА, СПУ – на современных PCY/SCADA

- Платформа «Лацерта» (SCADA) – Лаборатория Технологий Автоматизации
- Альфа-Платформа (SCADA) – Атомик Софт
- Мастер SCADA – Холдинг IEK
- SCADA TraceMode – Adastra
- SCADA Круг 2000 – НПФ «Круг»
- остальные специализированные или мелкие

Платформа «Лацрта»
PCU/SCADA



Платформа «Лацрта»

Модельно-ориентированная архитектура

Резервирование из коробки Active - Active

Десятки млн tps (сообщений в сек)

Поддержка разнообразия протоколов OT, IT

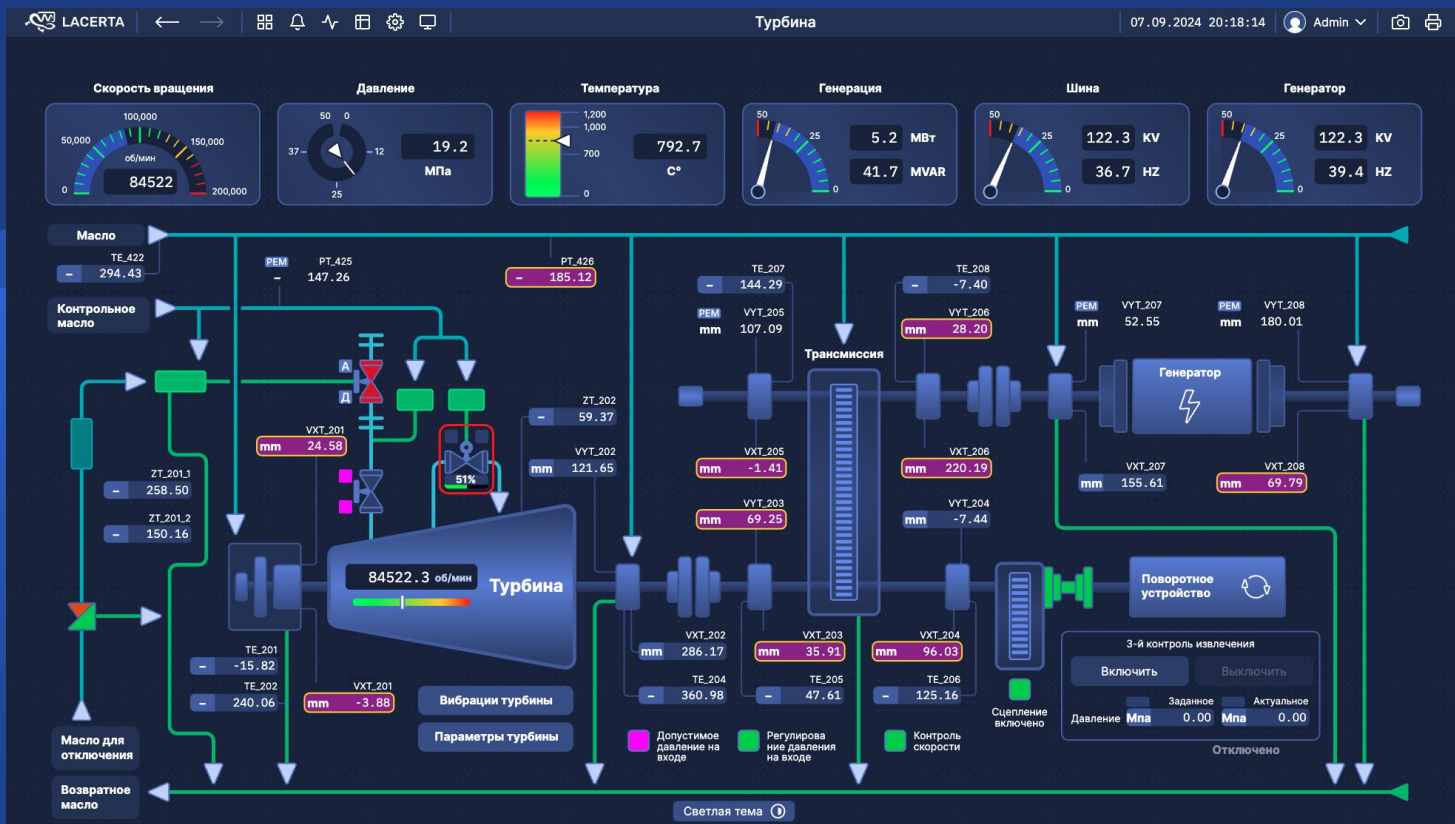
Кроссплатформенная

Развитый API разработки сервисов, приложений

Готова для разработки компонентов СУУ, СПА, СПУ



Платформа «Лацрта»



Платформа «Лацарта»

Колодовый контейнерный кран BMO ZPMС 064

08.09.2024 03:27:35 admin

Кран включен

Кран движется

Привод тележки работает

Сприндер посылан

Замки сприндера открыты

Грузовой привод работает

Замки сприндера закрыты

Режим сприндера выбран

Сприндер на 40 футов

Моточасы подъяма: 54337,00

Моточасы движения краном: 18361,00

Моточасы работы главного автомата: 92954,00

Моточасы работы сприндера: 44445,00

Моточасы работы грузовой тележки: 39957,00

Счетчик контейнеров: 2013845

Масса груза: 0,00

Положение сприндера: 16,93

Положение тележки: 37,17

Скорость движения грузовой тележки: 6553,40

Скорость подъема/опускания сприндера: 0,00

Скорость движения крана: 0,00

Аварийные кнопки:

- На портале со стороны моря снаружи
- В шите управления на портале
- В электропомещении
- В кабине на правой панели
- На портале справа с морской стороны
- На портале слева со стороны берега изнутри
- На портале слева с морской стороны
- На портале справа со стороны берега изнутри
- На платформе кабельного барабана
- На портале со стороны берега снаружи
- На тросике

Объект	Дата и время	Сообщение	Пользователь	Состояние	Класс	Приоритет	Действие
FL2005	08.09.2024 18:3516	BMO ZPMС 064. Аварийная кнопка в шите управления на портале	Не активен	КРИТ СМК	10		Категорично
SP840	08.09.2024 03:3717	BMO ZPMС 064. Сприндер на 40 футов	Активен	УВЕД СМК	1		
Сопил_дп	08.09.2024 07:0410	BMO ZPMС 064. Кран включен	Активен	УВЕД СМК	1		

Портальный кран Gottwald НКК 170EG №86388

08.09.2024 07:54:49 admin

Редуктор 1

Т1 Виброскорость: мм/с 0.01

Т2 Виброскорость: мм/с 0.00

Т3 Виброскорость: мм/с 0.02

Т4 Виброскорость: мм/с 0.02

Редуктор 2

Т5 Виброскорость: мм/с 0.01

Т6 Виброскорость: мм/с 0.01

Т7 Виброскорость: мм/с 0.02

Т8 Виброскорость: мм/с 0.03

Входные валы

Температура входного вала: 22,97 °C

Температура выходного вала: 22,65 °C

Выходные валы

Температура входного вала: 21,60 °C

Температура выходного вала: 21,53 °C

Объект	Дата и время	Сообщение	Пользователь	Состояние	Класс	Приоритет	Действие
Сопилка_дп	08.09.2024 07:5419	СМК 86388. Редуктор_установка_L05_216. Кран включен на время чистки веревочной системы	Не активен	КРИТ СМК	10		Категорично
Увел_дп	01.09.2024 11:4819	СМК 86388. Завершили монтаж ЦОД В_ L04_212. Защита законна	Не активен	КРИТ СМК	10		Категорично
Увел_дп	03.09.2024 08:5328	СМК 86388. Провели гармон. чистку L04_217. Защита разорвана	Не активен	КРИТ СМК	10		Категорично

События

08.09.2024 03:18:43 admin

Объект	Дата и время	Сообщение	Состояние	Класс	Приоритет	Действие
SP840	08.09.2024 03:3717	BMO ZPMС 064. Сприндер на 40 футов	Активен	УВЕД СМК	1	
Сопил_дп	08.09.2024 07:0410	BMO ZPMС 064. Кран включен	Активен	УВЕД СМК	1	
Увел_дп	08.09.2024 03:1815	СМК 86388. Увеличена часть L412_3708. Портал Завершена	Активен	УВЕД СМК	1	
Сопил_дп	07.09.2024 20:2810	BMO ZPMС 063. Кран включен	Активен	УВЕД СМК	1	
FL219	07.09.2024 15:5310	РТО Канал 0E1. Угловой датчик протестирования дальний правый угол	Активен	КРИТ СМК	5	Категорично
FL218	07.09.2024 15:5058	РТО Канал 0E1. Угловой датчик протестирования ближний правый угол	Активен	КРИТ СМК	5	Категорично
FL214	07.09.2024 14:2957	РТО ЗПМС 0E2. Движение сприндера 20 футов	Активен	УВЕД СМК	1	
FL213	07.09.2024 14:1656	РТО ЗПМС 0E1. Датчик нагрузки лево. стороны перегруз	Не активен	КРИТ СМК	5	Категорично
FL217	07.09.2024 10:4000	РТО Канал 0E1. Угловой датчик протестирования ближний правый угол	Активен	КРИТ СМК	5	Категорично
FL213	07.09.2024 10:3843	РТО ЗПМС 0E2B. Угловой датчик протестирования дальний правый угол	Не активен	КРИТ СМК	5	Категорично
WORK	07.09.2024 11:0107	СМК РедукторB. Устройство Компрессорное оборудование. Устройство работает	Активен	УВЕД ПЕСКО	1	
WORK	07.09.2024 11:0700	СМК РедукторB. Устройство АГВ ННТ. Устройство работает	Активен	УВЕД ПЕСКО	1	
WORK	07.09.2024 11:0607	СМК РедукторB. Устройство АГВ 10 тр. ТП. Устройство работает	Активен	УВЕД ПЕСКО	1	
FL217	07.09.2024 10:5721	РТО Канал 0E1. Угловой датчик протестирования дальний правый угол	Активен	КРИТ СМК	5	Категорично
FL214	07.09.2024 08:1827	РТО ЗПМС 0E2B. Угловой датчик протестирования ближний правый угол	Не активен	КРИТ СМК	5	Категорично
FL210E3	07.09.2024 08:1844	ST3 ЗПМС 005. Аварийная кнопка в помещении управления консолями	Не активен	КРИТ СМК	10	Категорично
Сопилка_дп	07.09.2024 07:4832	ST3 ЗПМС 005. Подъемник активен	Активен	УВЕД СМК	1	
FL213	07.09.2024 07:1059	РТО ЗПМС 0E2T. Угловой датчик протестирования ближний правый угол	Не активен	КРИТ СМК	5	Категорично
FL218	08.09.2024 07:5048	РТО Канал 0E1. Угловой датчик протестирования ближний правый угол	Активен	КРИТ СМК	5	Категорично
Увел_дп	08.09.2024 14:0238	СМК 86388. Увеличена часть L412_3708. Портал Завершена	Активен	УВЕД СМК	1	
Увел_дп	08.09.2024 10:5933	СМК 86388. Редуктор_установка_L05_216. Выключатель крана выкл.	Активен	УВЕД СМК	1	
Увел_дп	08.09.2024 10:5533	СМК 86388. Редуктор_установка_L04_231_36. Выключатель крана отпущен в положение	Активен	УВЕД СМК	1	
Увел_дп	08.09.2024 10:5131	СМК 86388. Магистраль кабельная_031_А_А01_1002. Лампа Крана Выключена	Активен	УВЕД СМК	1	

Тренды

08.09.2024 03:16:41 admin

1 неделя | 12 часов | Мгн/Узел крана

СМК 86388. P1. T1. ОКС виброскор... мм/с

СМК 86388. P2. T5. ОКС виброскор... мм/с

СМК 86388. P1. T2. ОКС виброскор... мм/с

СМК 86388. P1. T3. ОКС виброскор... мм/с

СМК 86388. P1. T4. ОКС виброскор... мм/с

СМК 86388. P2. T6. ОКС виброскор... мм/с

СМК 86388. P2. T7. ОКС виброскор... мм/с

СМК 86388. P2. T8. ОКС виброскор... мм/с

Платформа «Лацерта»

Объекты

Поиск

- ▼ Brewery: Directory: Пивоварня
 - # Yeast_Level: Float: Датчик уровня FloatSinusoid
 - ▼ Brew_kettle: Directory: Заварочный чайник
 - ▼ Analog_Density: Analog: Датчик плотности
 - ☑ Danger: Boolean: ВК → Датчик плотности: Опасность OPCUA_01
 - ☑ Falsity: Boolean: ВК → Датчик плотности: Недостоверность BoolFix
 - ☑ Fault: Boolean: ВК → Датчик плотности: Неисправность True False
 - ☑ Repair: Boolean: ВК → Датчик плотности: Ремонт BACnet True
 - ☑ Warning: Boolean: ВК → Датчик плотности: Предупреждение BoolFix
 - # Value: Float: ВК → Датчик плотности: Значение FloatSinusoid
 - + Новый объект
 - > Analog_TankLevel: Analog: Датчик уровня
 - > Analog_Turbidity: Analog: Датчик мутности
 - > Discrete_On: Discrete: Датчик работы загара
 - + Новый объект
 - > Bright_beer_tank: Directory: Резервуар розлива
 - > CO2: Directory: CO2
 - > Cooler: Directory: Холодильник
 - > Fermenter: Directory: Ферментер

Подключить драйвер

Имитация

Вычисление

Формула

Analog_Density.Value >= 140

Полноэкранный режим ⓘ Математические операции

Отмена Сохранить

Платформа «Лацрта»

OPC UA

Modbus TCP

ProfiNet / S7comm

MQTT

SNMP

ICMP

МЭК 61850

BACnet

EtherCAT

МЭК 60870

Powerlink

DNP3

HART

Платформа «Лацрта»

Настройки

Поиск

- Основные
- LDAP**
- Keycloak
- Figma
- Тренды
- События
- Asterisk
- FindFace
- Orion
- Perco
- 1С ТОиР
- Trassir
- Zabbix

Выход

Шаблон дерева пользователя
{login}@example.com

Дерево для поиска пользователя
CN=Users, DC=example, DC=com

Хост сервера LDAP
localhost

Порт сервера LDAP
388

Размер страницы для постраничной загрузки данных
12

Дерево для поиска группы пользователей

Наименование группы пользователей

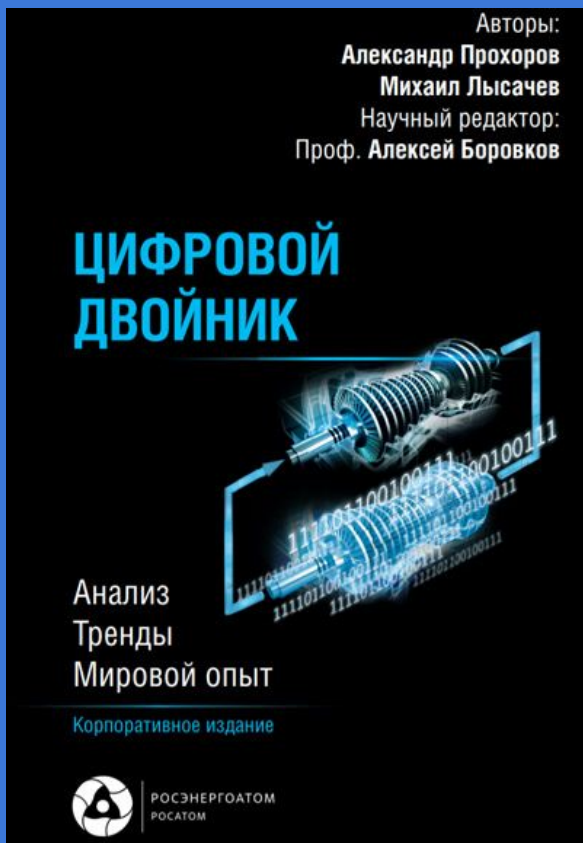
Полный путь сервисной учетной записи

Сохранить

Платформа «Лацрта»



Цифровой двойник – книга Александра Прохорова

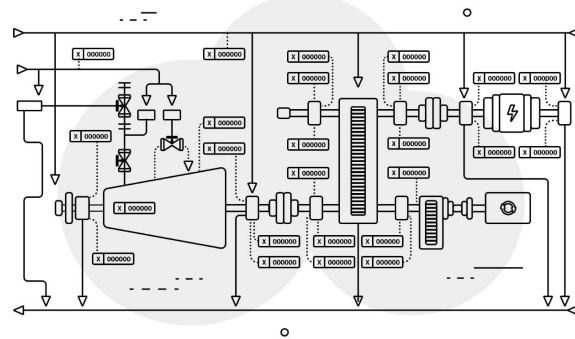


Ознакомиться с принципами построения РСУ,
пригодными для построения СУУ, СПА, СПУ
можно в моей книге

Архитектура высоконагруженных систем

Второе издание

Системы сбора информации
Распределенные системы управления
Системы реального времени



АСИО **АРПП**
Отечественный софт

Москва, 2024

Вадим Подольный

Спасибо за внимание!

Вадим Подольный

vp@arcslab.ru

t.me/vpp01

+7 916 530 46 56

