



МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«Моделирование в инженерном деле»

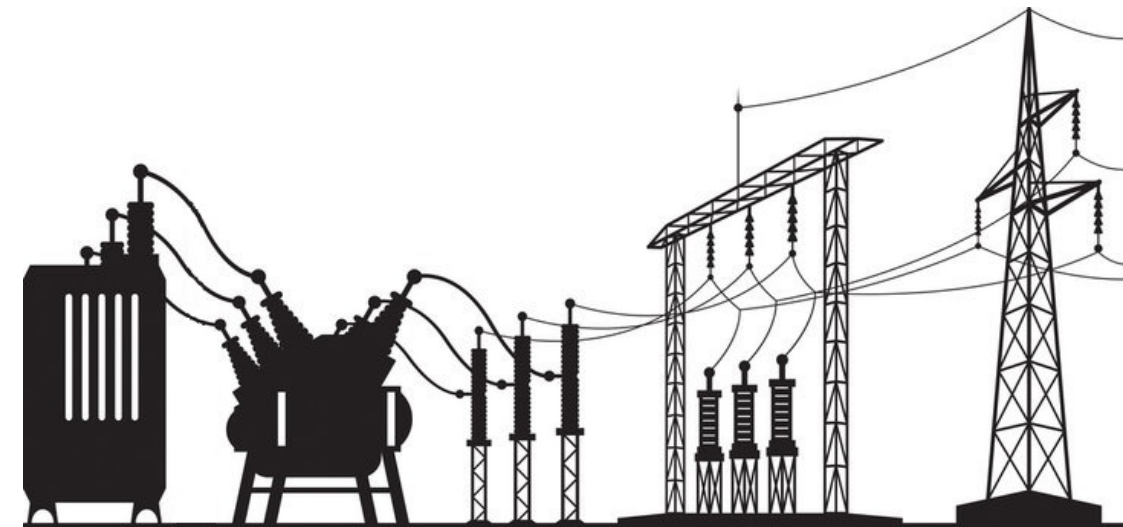
Цифровой двойник трансформатора на КПМ РИТМ

ЦИТМ Экспонента

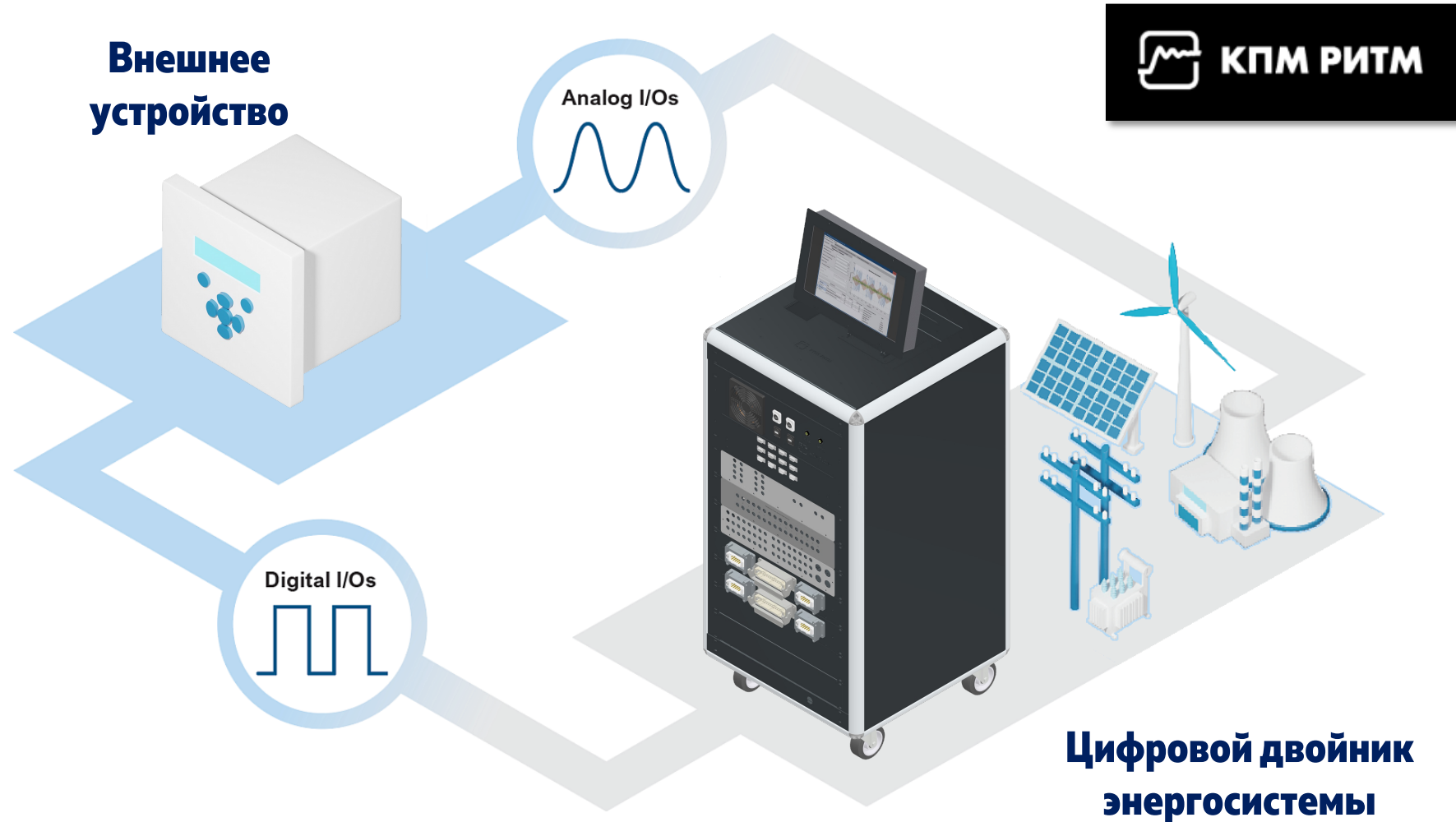
Гладков Дмитрий

Лаборатория цифрового моделирования электроэнергетических систем в ЦИТМ Экспонента

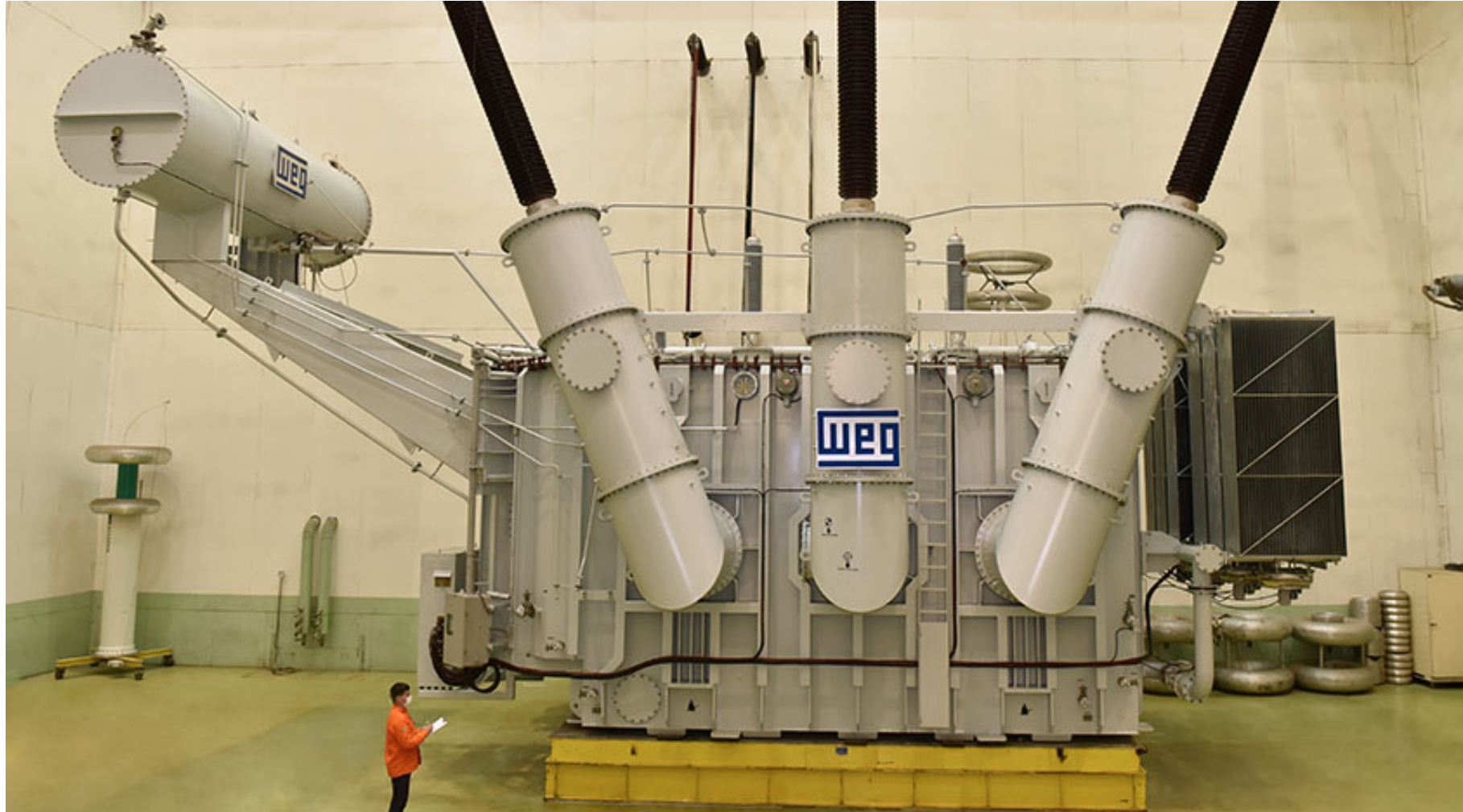
- **Разработка алгоритмов**
- **Моделирование энергосистем**
- **Киберполигоны на базе КПМ РИТМ**
- **Протоколы связи цифровой подстанции**
- **Лабораторные стенды для университетов**



Применение КПМ РИТМ в электроэнергетике



Силовой трансформатор



Уязвимые части трансформатора



чаще



Высоковольтные вводы

Обмотки

РПН

Система охлаждения

Устройства газовой защиты

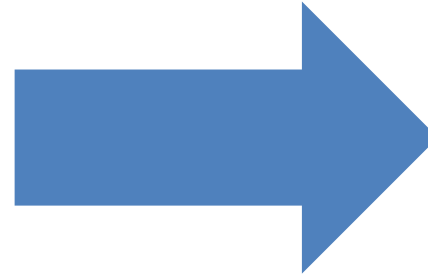
ПБВ

реже

Причины отказов трансформаторов



?



Причины отказов в процентах

Недостатки транспортировки, хранения и монтажа

Климатические и внешние воздействия

Дефекты ремонта

Нерасчетные режимы в сети

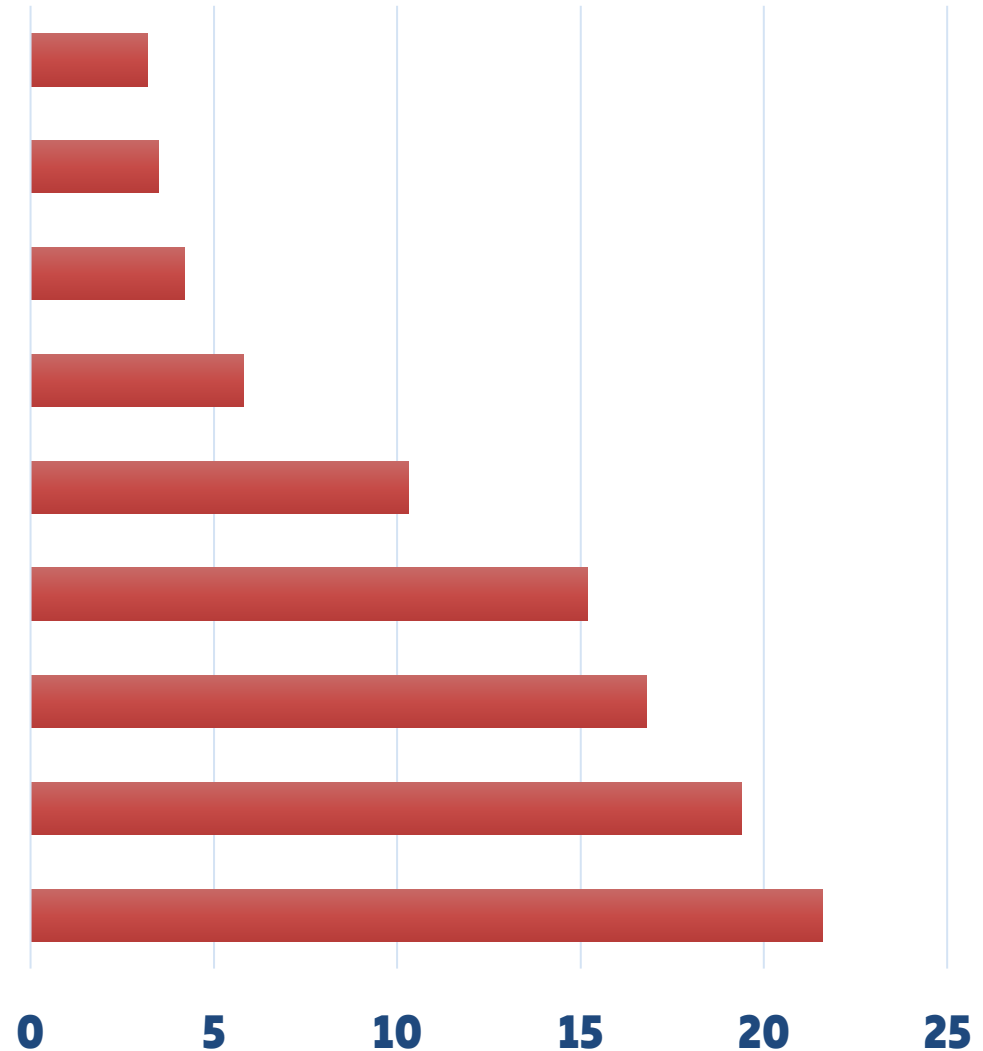
Посторонние воздействия

Не установленные причины

Недостатки эксплуатации

Дефекты конструкции и изготовления

Изменения свойств материалов (старение)



Особенности эксплуатации трансформатора



Длительный срок службы



Дорого обслуживать



Долго восстанавливать



Ущерб от отказов



Сложно выявить дефект



**«Умная»
система
мониторинга**



**Нет данных
для обучения**

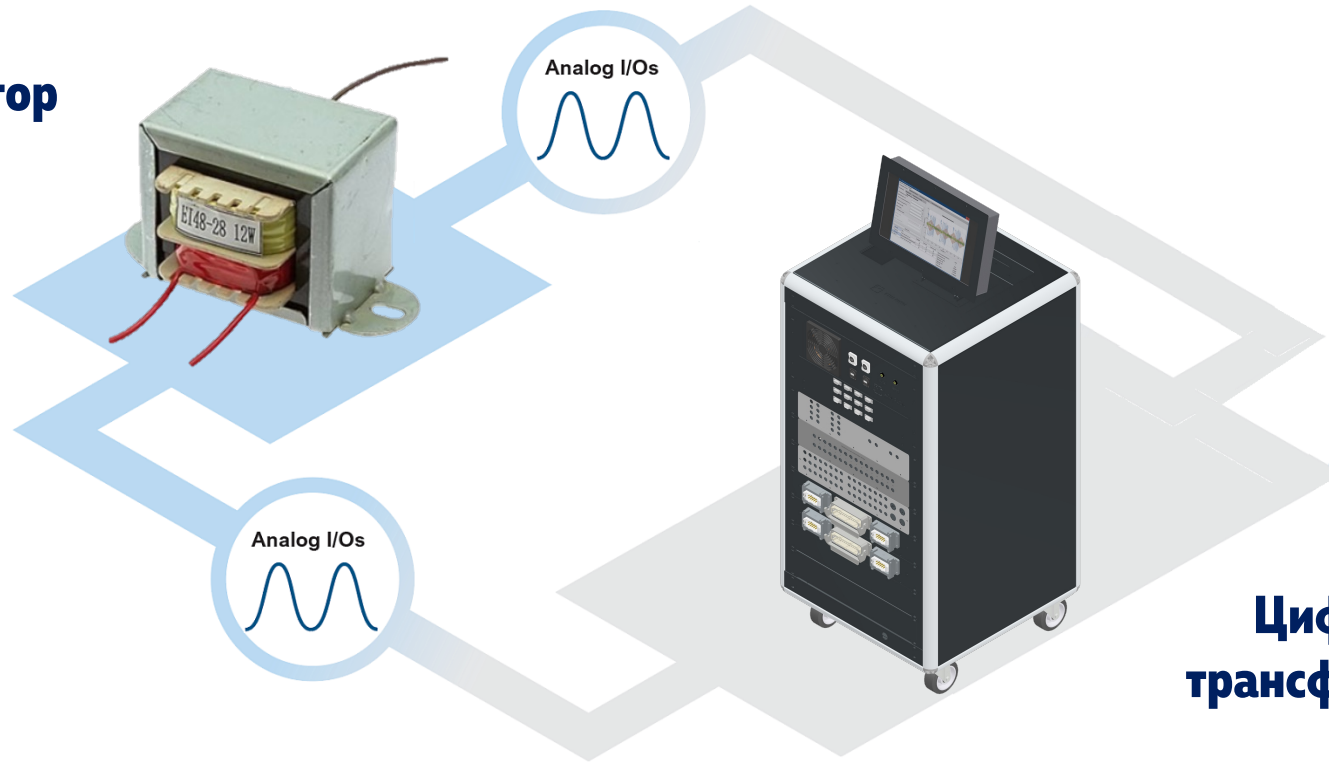


Цифровой двойник – источник данных



Цифровой двойник трансформатора

Трансформатор



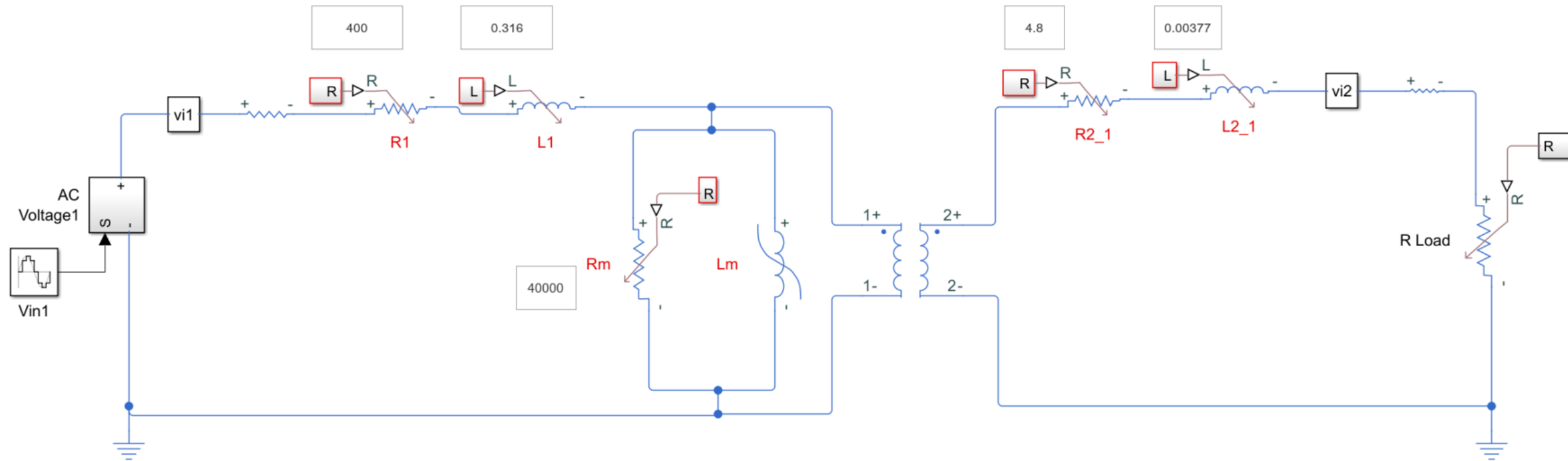
Цифровая модель
трансформатора на КПМ
РИТМ

модель + двухсторонняя связь с объектом = цифровой двойник

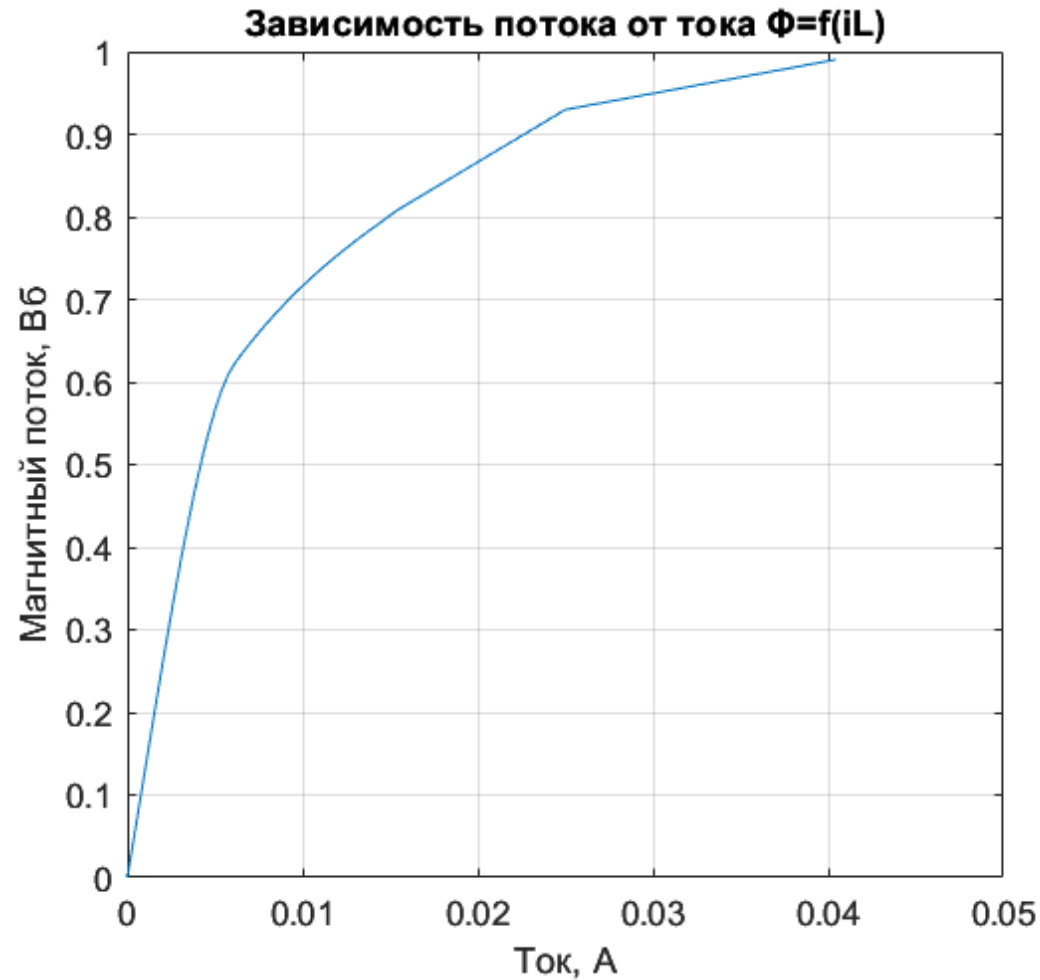
Принципы построения цифрового двойника

- **Аналог физического изделия, моделирующий электромагнитные процессы**
- **Входное напряжение на ЦД поступает с датчиков реального трансформатора, работающего параллельно**
- **Информация с реальных датчиков, сравнивается с показаниями виртуальных датчиков ЦД**

Построение модели трансформатора

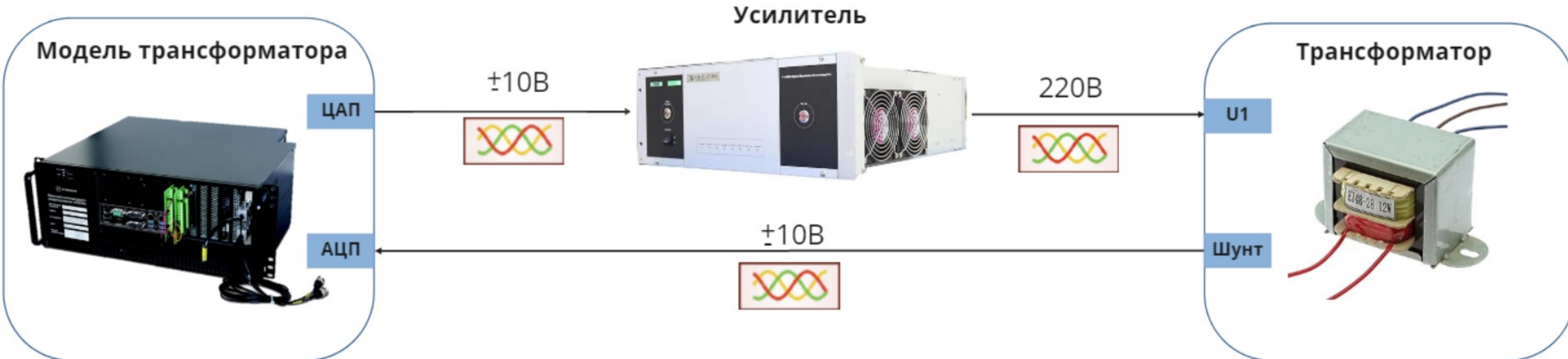


Основная кривая намагничивания



*для подбора координат использовался инструмент **Parameter Estimator**

Принципиальная схема



Экспериментальная установка

Усилитель

КПМ РИТМ

Связь с компьютером
через Ethernet

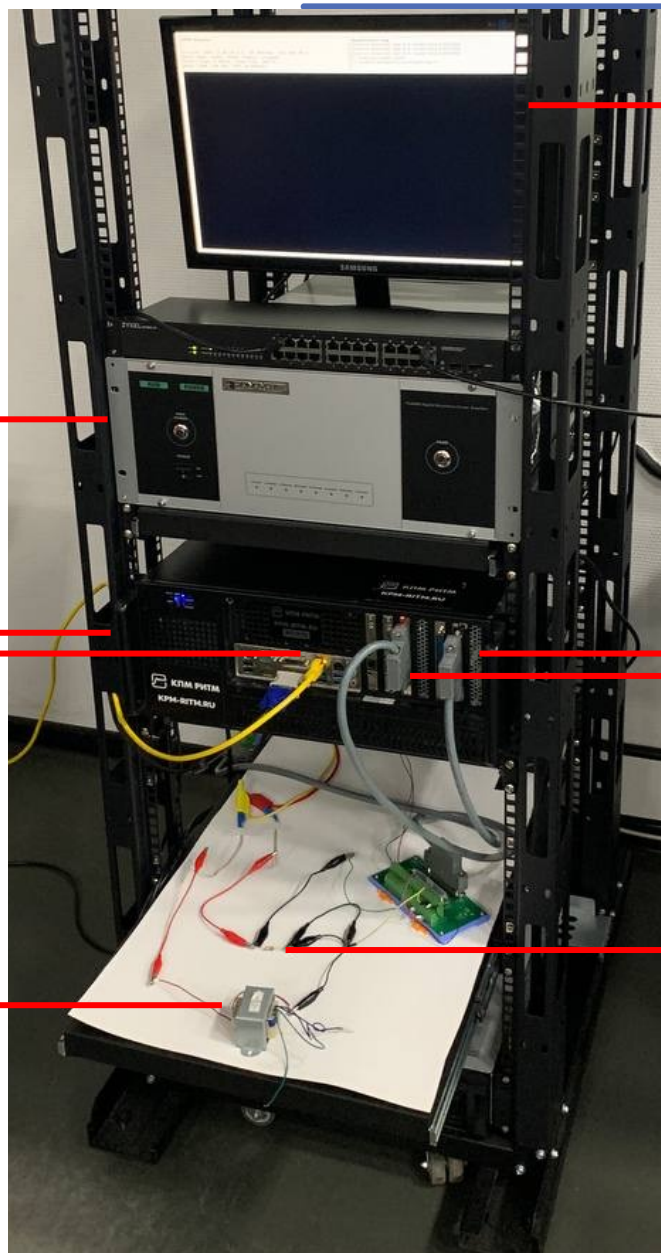
Двухобмоточный
однофазный
трансформатор 12 Вт
220/24

Монитор КПМ РИТМ

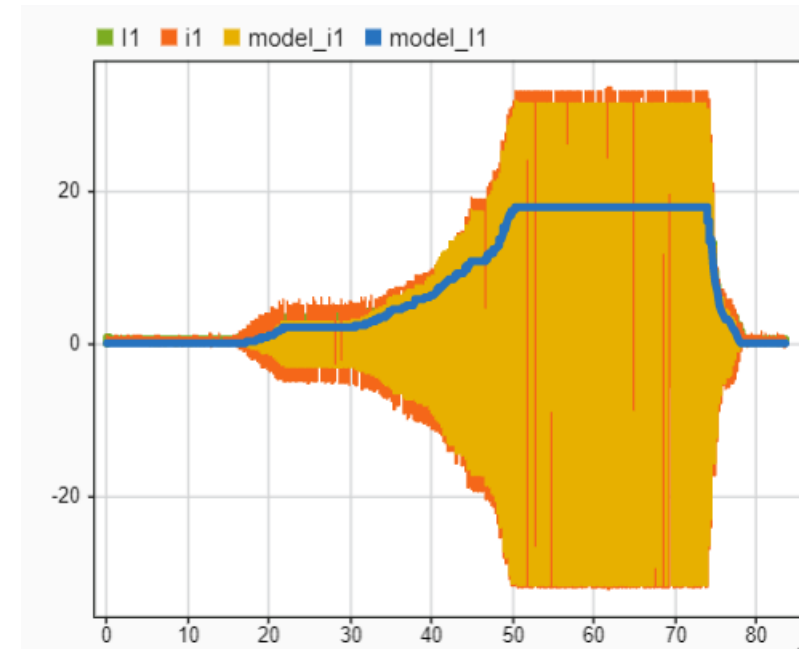
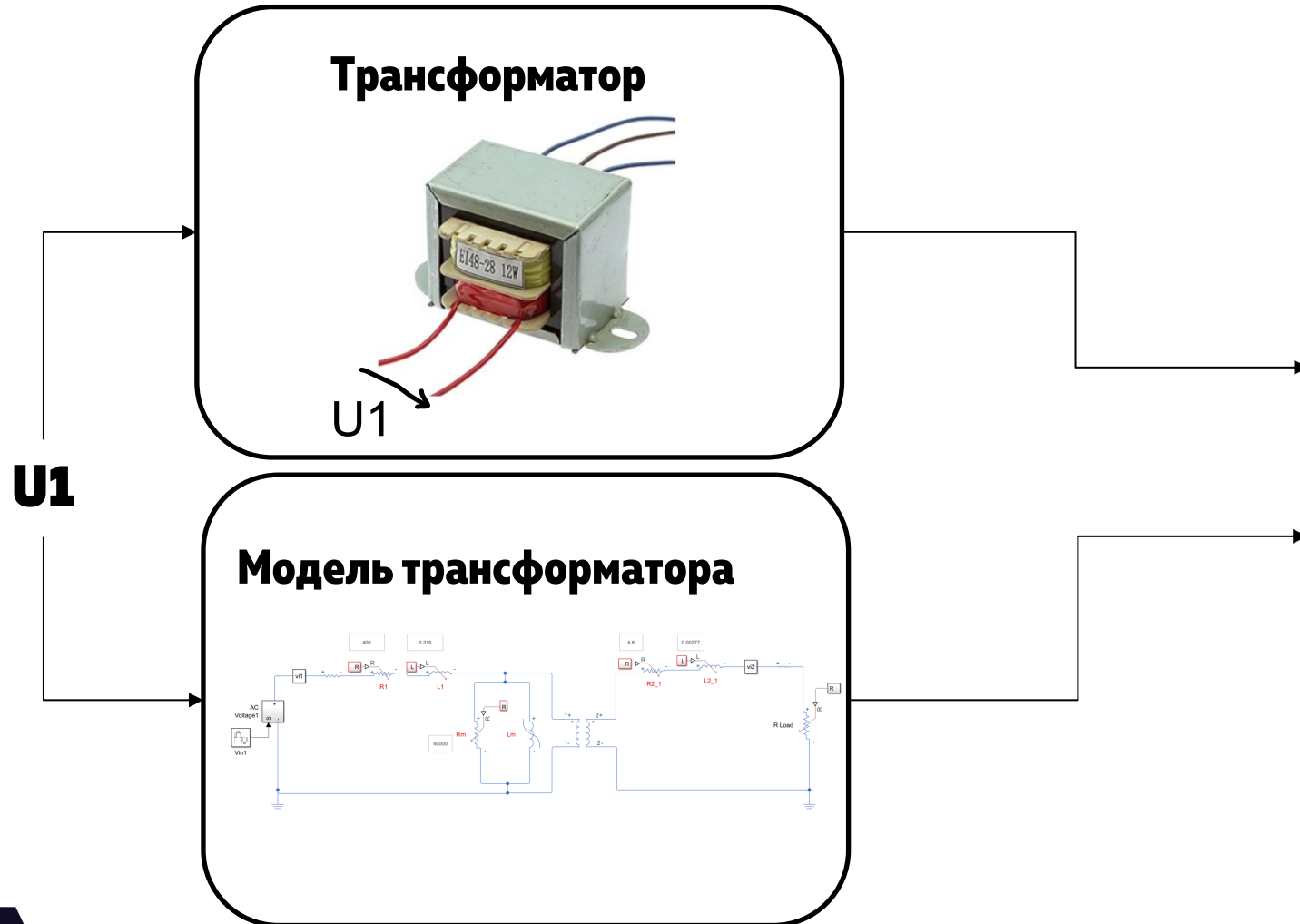
Цифро-аналоговый
преобразователь (ЦАП)

Аналогово-цифровой
преобразователь (АЦП)

Измерительный шунт

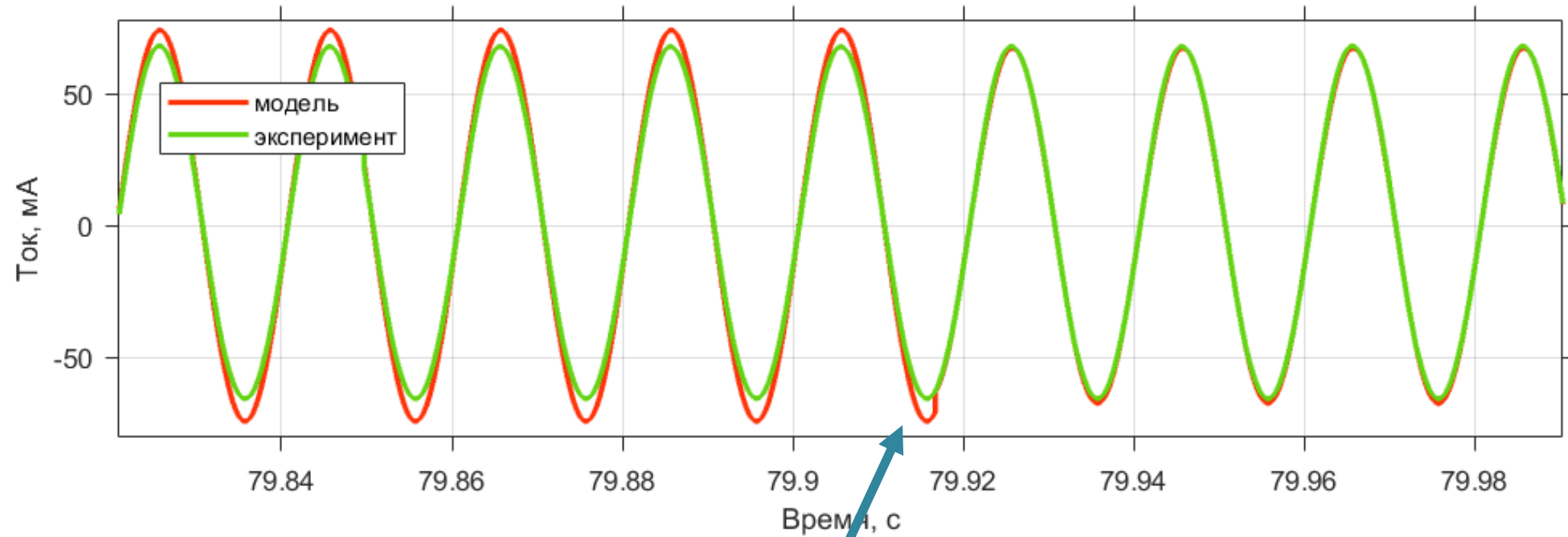


Результаты эксперимента и моделирования



**Осциллограммы токов и напряжений
в режиме online**

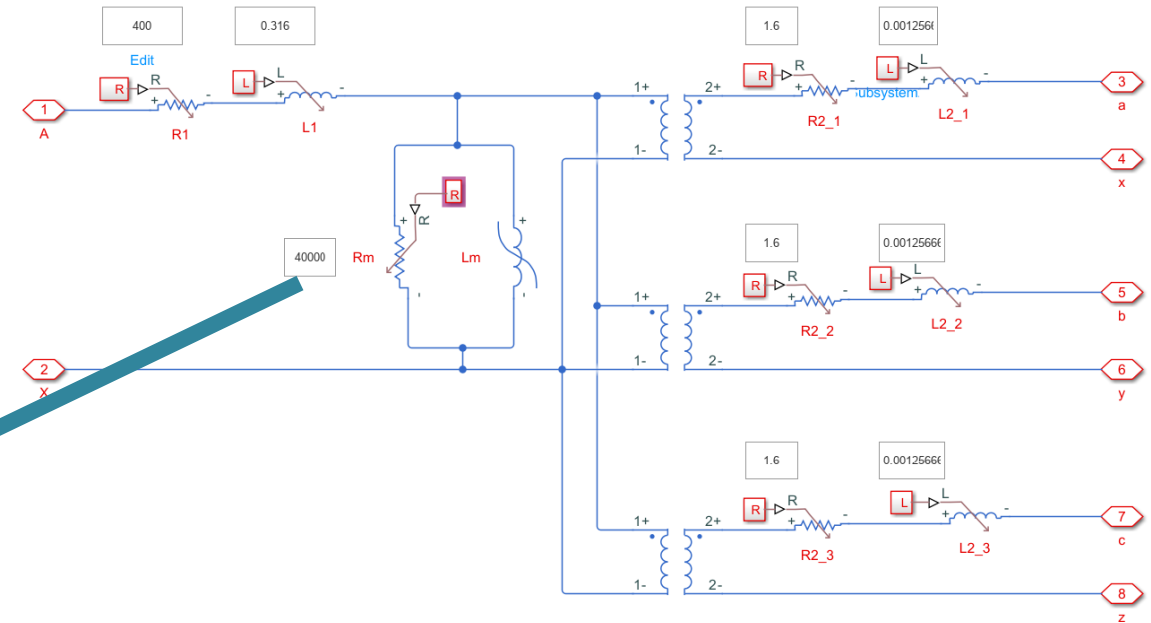
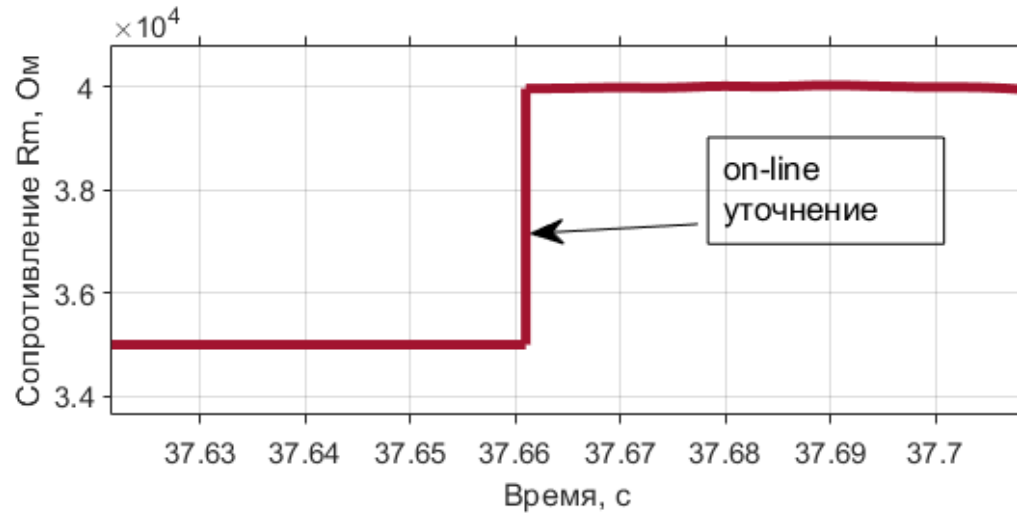
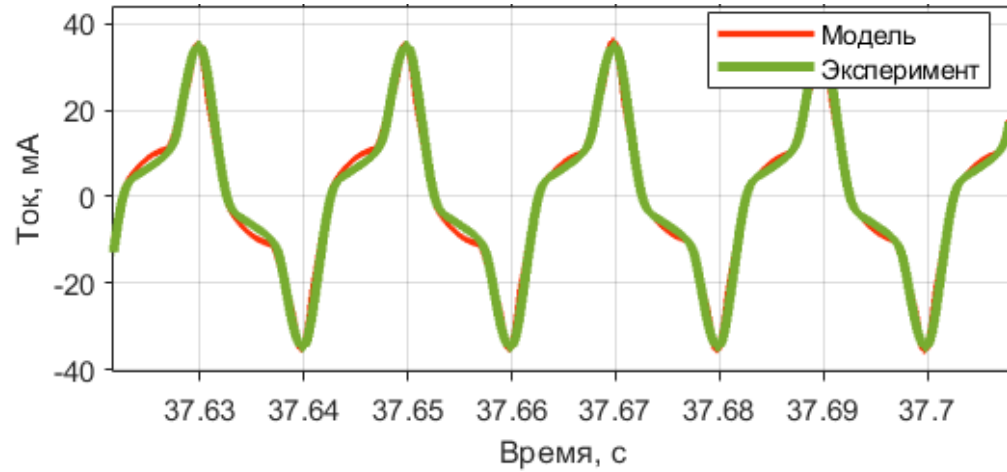
Параметры модели обновляются «на лету»



Момент включения режима уточнения параметров

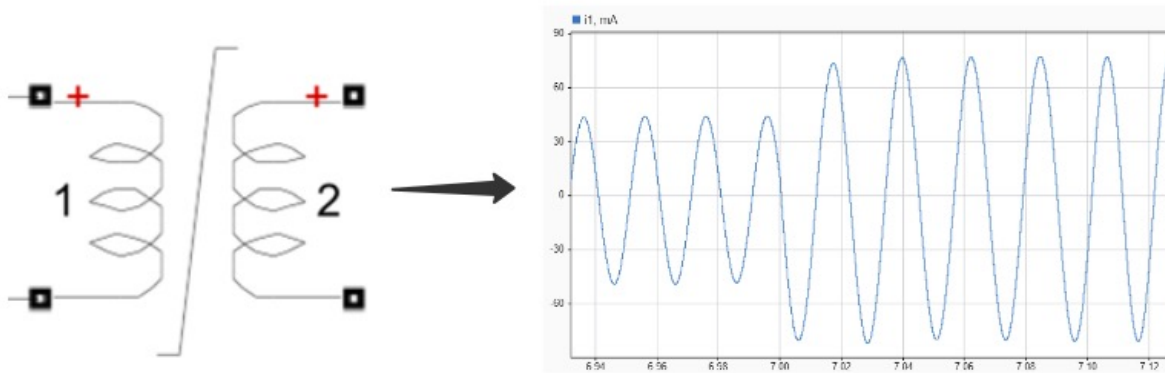
$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}}$$

Параметры модели обновляются «на лету»



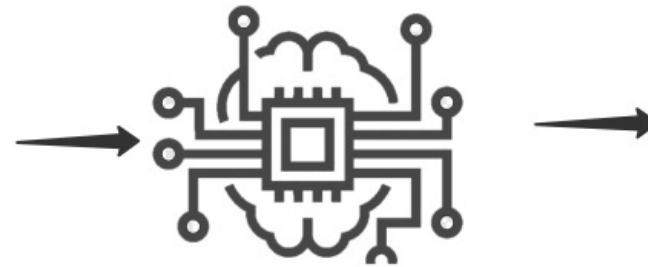
$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}}$$

ЦД генерирует данные

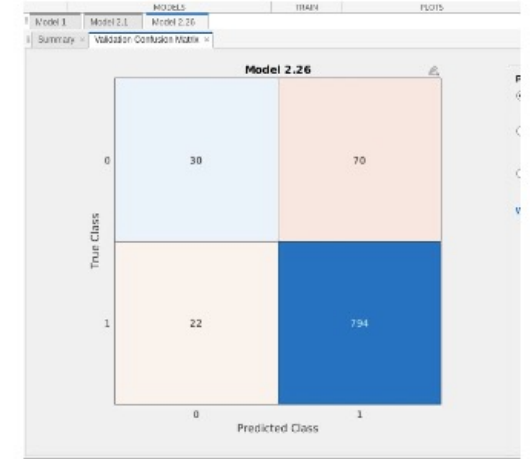


Цифровой
двойник

Данные



Машинное
обучение
на нормальном и
аварийном датасете



Валидация
полученного
алгоритма

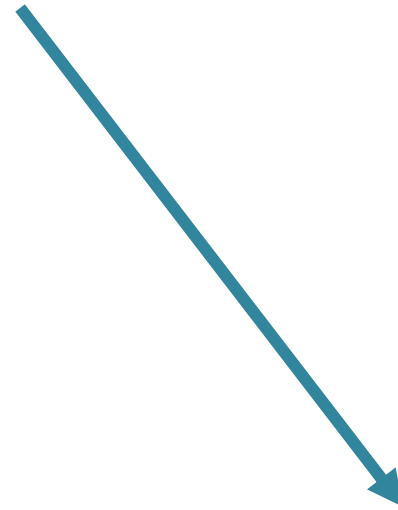
Режимы для машинного обучения



Нормальный режим



**Режим
межвиткового замыкания**



**Режим
отклонения параметров**

Режим межвиткового замыкания



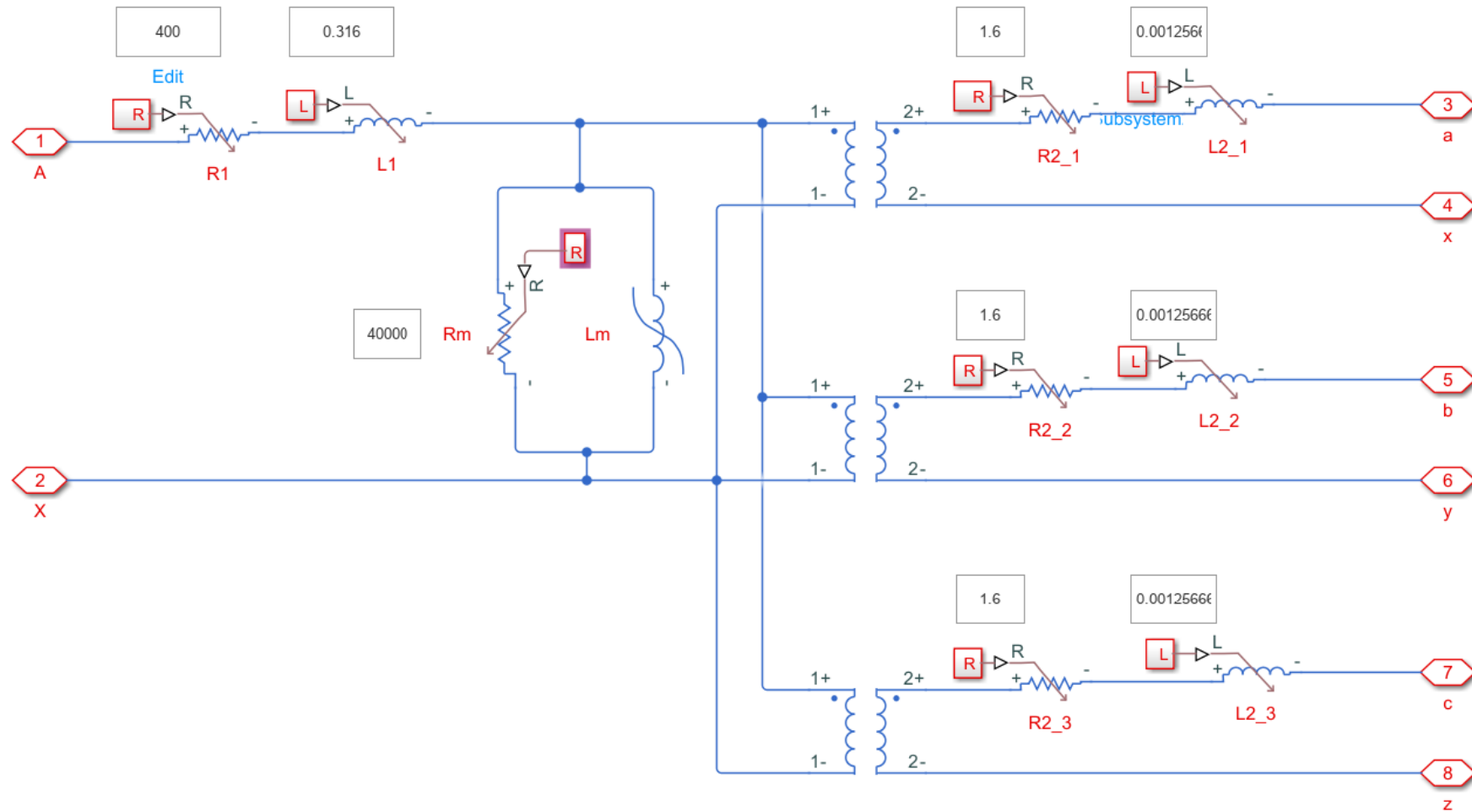
Причины возникновения:

Старение изоляции (механическое, тепловое, электрическое, механическое, химическое)

Перенапряжения (атмосферные, внутренние, дуговые)

Производство и эксплуатация (заводские дефекты, эксплуатационные дефекты, дефекты при капитальном ремонте)

Моделирование межвитковых замыканий



Изменяется
количество витков и
сопротивление МКЗ



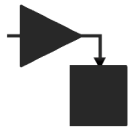
Режим отклонение параметров

Дефект	Изменение параметра
Межвитковое замыкание	Уменьшение R_1, X_1, R_2 и X_2
Деформация обмотки после короткого замыкания	Увеличение L_1, L_2
Ухудшение контактных соединений	Увеличение R_1, R_2
Изменение свойств ферромагнитного материала	Изменение R_0, X_0

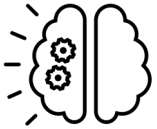
**Расчет диагностических параметров
на каждом шаге расчета модели:**

$$\begin{aligned}
 R_m &= \operatorname{Re} Z_{ij} \\
 X_{kj} &= \operatorname{Im} Y_{jj}^{-1} \\
 (L_{kj} &= \omega^{-1} \cdot \operatorname{Im} Y_{jj}^{-1})
 \end{aligned}$$

Выводы:



качественная модель – залог успеха



нет данных для обучения – генерируй с помощью ЦД



прототип системы на КПМ РИТМ – быстро и эффективно



ЭКСПОНЕНТА

Центр Инженерных Технологий
и Моделирования

Telegram канал



@EXPONENTA_ENERGY

📍 Москва, 2-й Южнопортовый проезд,
д. 31, стр. 4

☎ +7 (495) 009 65 85

✉ info@exponenta.ru
tech@exponenta.ru

🌐 matlab.ru
exponenta.ru