



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Постановка задачи динамической оптимизации процесса управления проветриванием подземных горнодобывающих предприятий

Проект НУГ № 21-04-039

*«Динамическая оптимизация параметров контура
управления киберфизической системы проветривания
подземного горнодобывающего предприятия»*

А.В. Кычкин, к.т.н., зав. НУЛ МЭИ, НИУ ВШЭ – Пермь



История кооперации



Кафедра технологий электропривода
и транспортных систем
Высшей инженерной школы
(Высшей школы технических наук)
им. Георга Агриколы (г. Бохум, Германия)



Штефан Фёт



Кафедра горной электромеханики
Пермского национального
исследовательского
политехнического университета
(г. Пермь)



Николаев А.В.



ООО «Фабрика цифровых решений»
(г. Пермь)



Русаков Ю.А.



О проекте

Потребление
электроэнергии
в горной промышленности
~300 млрд. руб/год

На проветривание
расходуется до 50% ЭЭ

Потенциал экономии 10%
(~30 млрд. руб/год)

Задачи:

- снижение затрат
- управление спросом на электроэнергию
- онлайн энергоаудит



Схема рудника (пример 1)

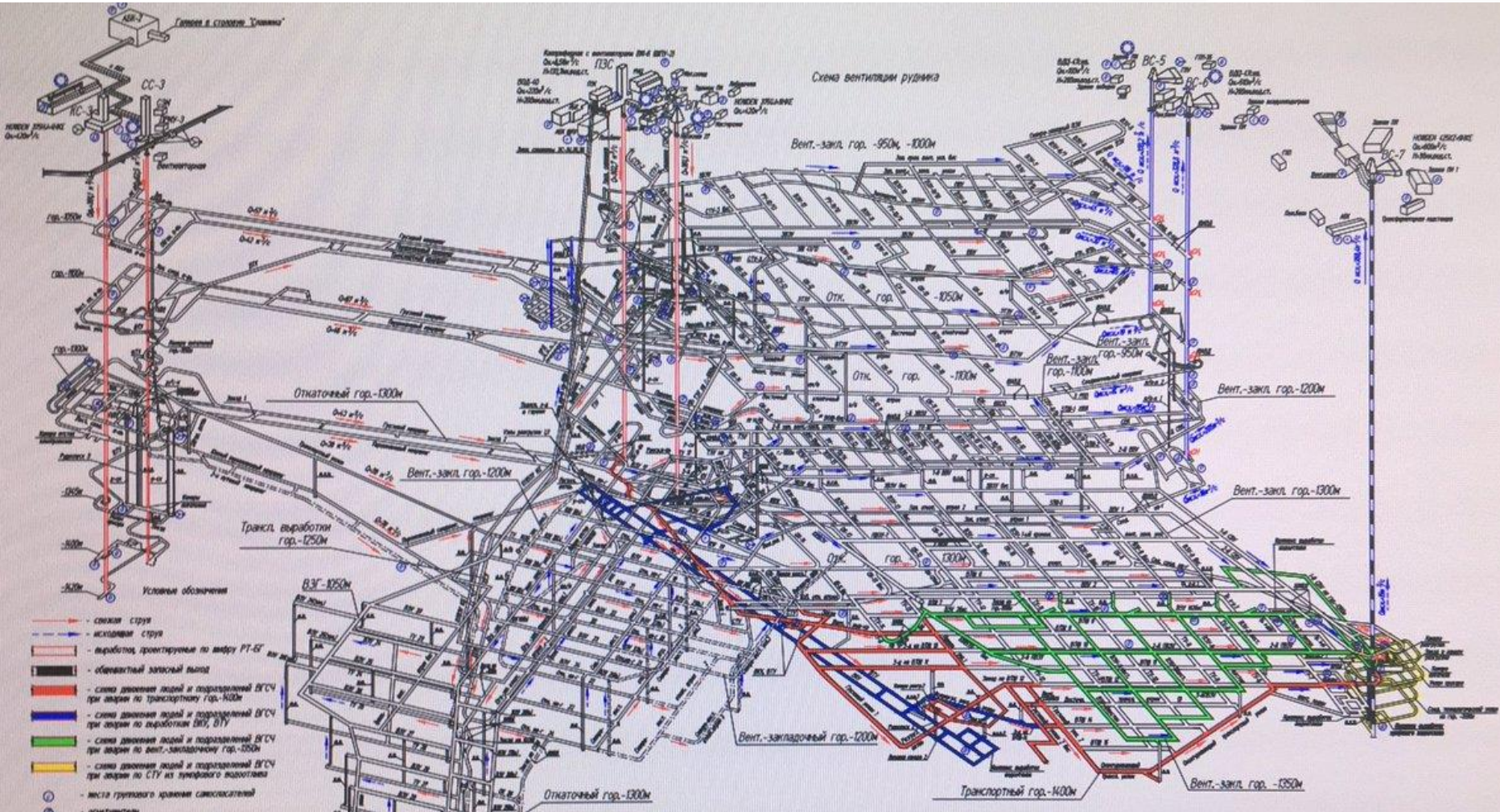
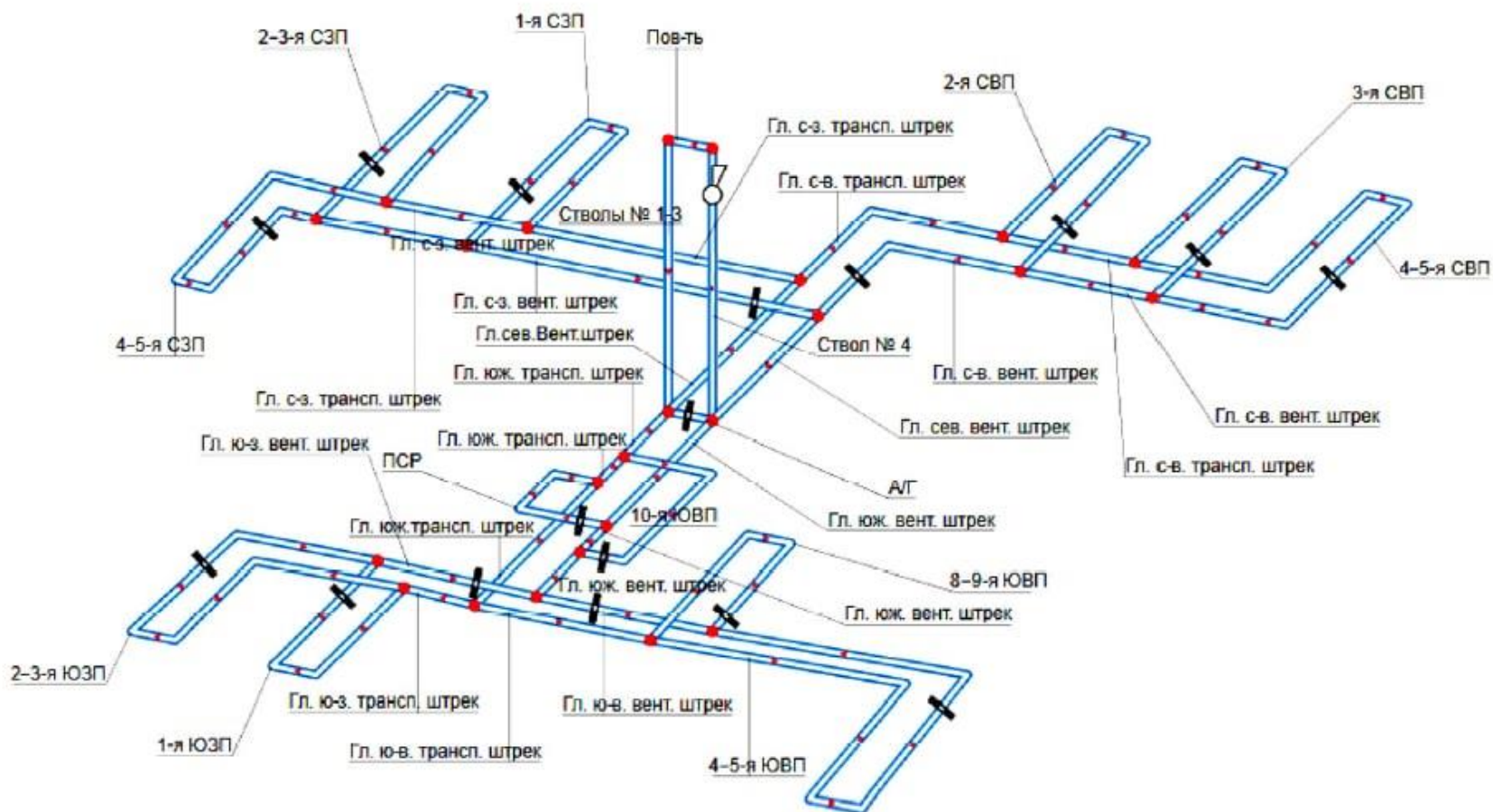
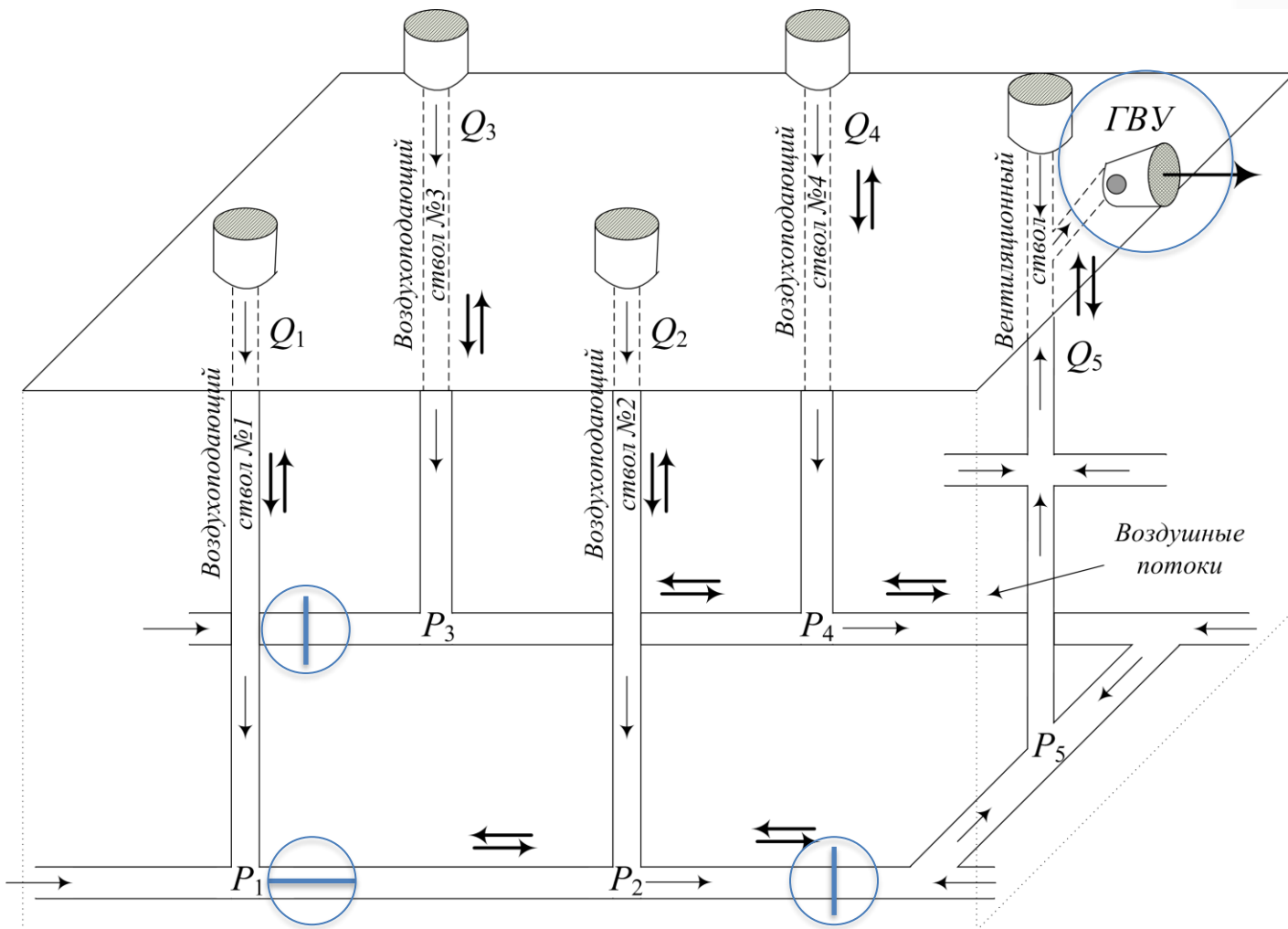


Схема БКПРУ-4 (пример 2)



[Русаков Ю.А., 2020 г.]

Основные элементы системы проветривания



Глубина: 400 м

Расстояние:
более 10 км

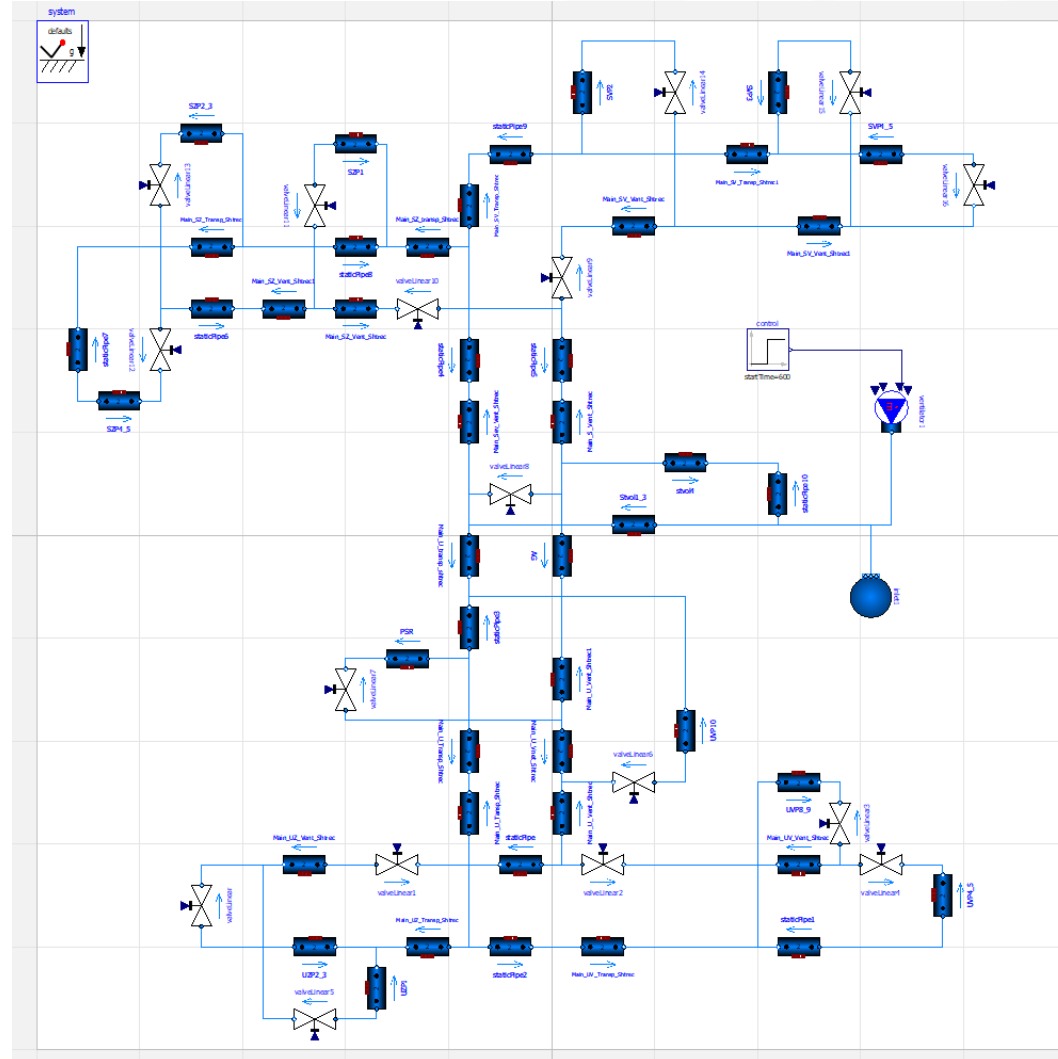
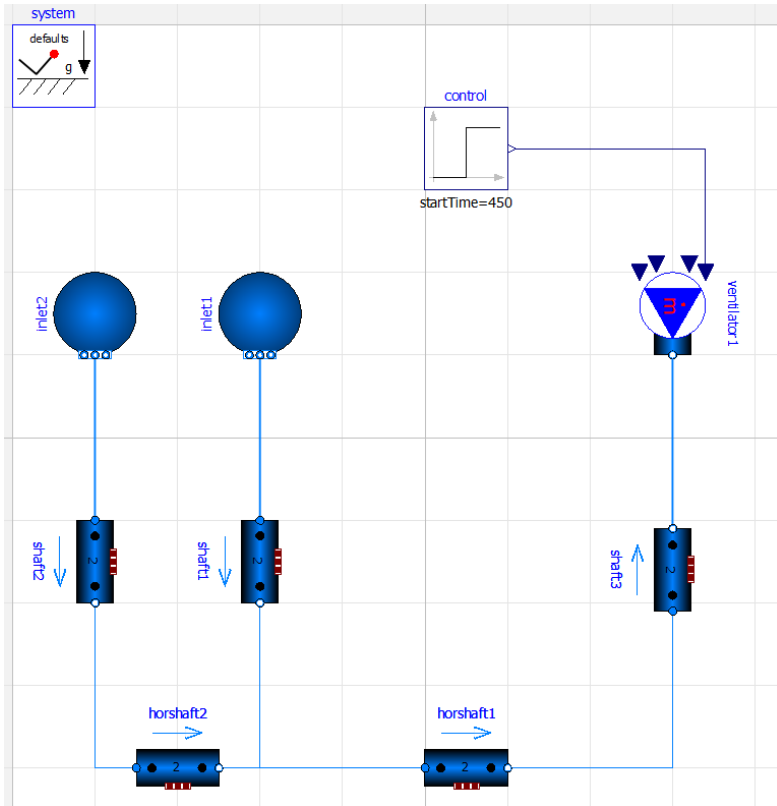
Диаметр гориз. проходов: 5 м

Диаметр верт. стволов: 7 м

Атм. давление:
100 кПа

Производительность ГВУ:
450 кг/с

Имитационная модель процесса проветривания



Объект управления – процесс проветривания, то есть процесс распределения воздуха в вентиляционной сети

Цели управления (критерии):

1. обеспечение достаточным количеством воздуха всех рабочих мест и путей перемещения машин в подземных выработках на уровне безопасности (Ц1)
2. поддержание температуры воздуха в допустимых границах (Ц2)
3. минимизация затрат на энергопотребление при проветривании (Ц3)

Алгоритм:

1. Изменение производительности главной вентиляторной установки
2. Регулирование параметров на калориферной установке
3. Изменение состояния вентиляционных дверей
4. Установка и снятие изолирующих устройств

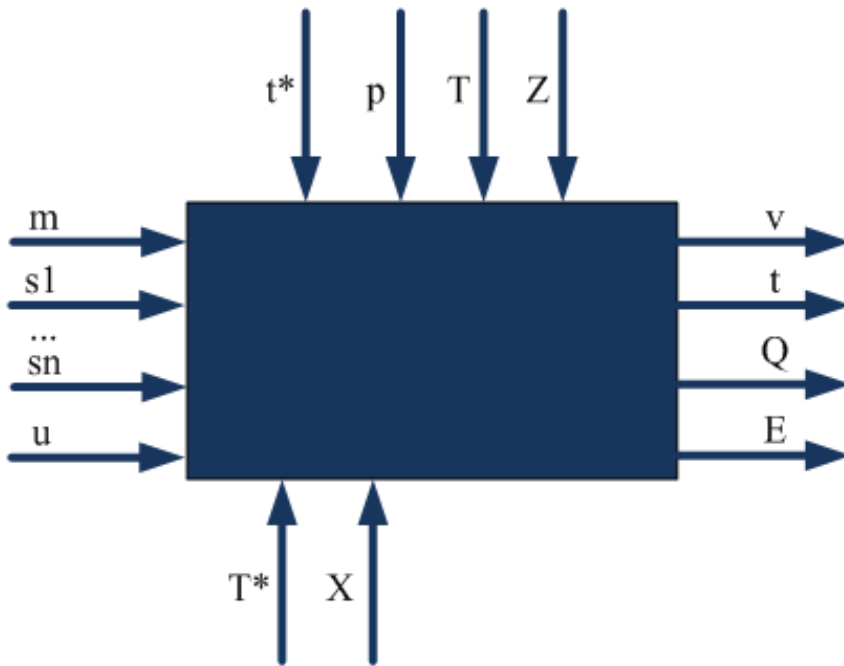
Ограничения:

1. Правила безопасности
2. План ведения горных работ
3. Климатические условия

Факторы, влияющие на изменение объемного расхода воздуха

1. Топология вентиляционной сети, изменения длины и сечения выработок в процессе выполнения горных работ
2. Перекрытие сечения выработки с помощью изолирующих устройств (перемычка)
3. Частичное перекрытие сечения выработки с помощью АВД – автоматических вентиляционных дверей
4. Движение транспорта
5. Сезонные и суточные колебания параметров воздуха, вызванные естественной тягой
6. Параметры окружающей среды
7. Аварийные режимы работы
 - Реверс потока воздуха
 - Работа изолирующих устройств

Процесс проветривания как «черный ящик»



Контролируемые параметры:

v – объемный (массовый) расход воздуха;
 t – температура воздуха;
 Q – содержание газов и вредных веществ;
 E – энергопотребление;

Управляющие параметры:

m – управляющее воздействие подсистемы управления главной вентиляционной установкой;
 $s1...sn$ – положение управляемых вентиляционных дверей и состояние вспомогательных вентиляторов;
 u – управление калорифером;

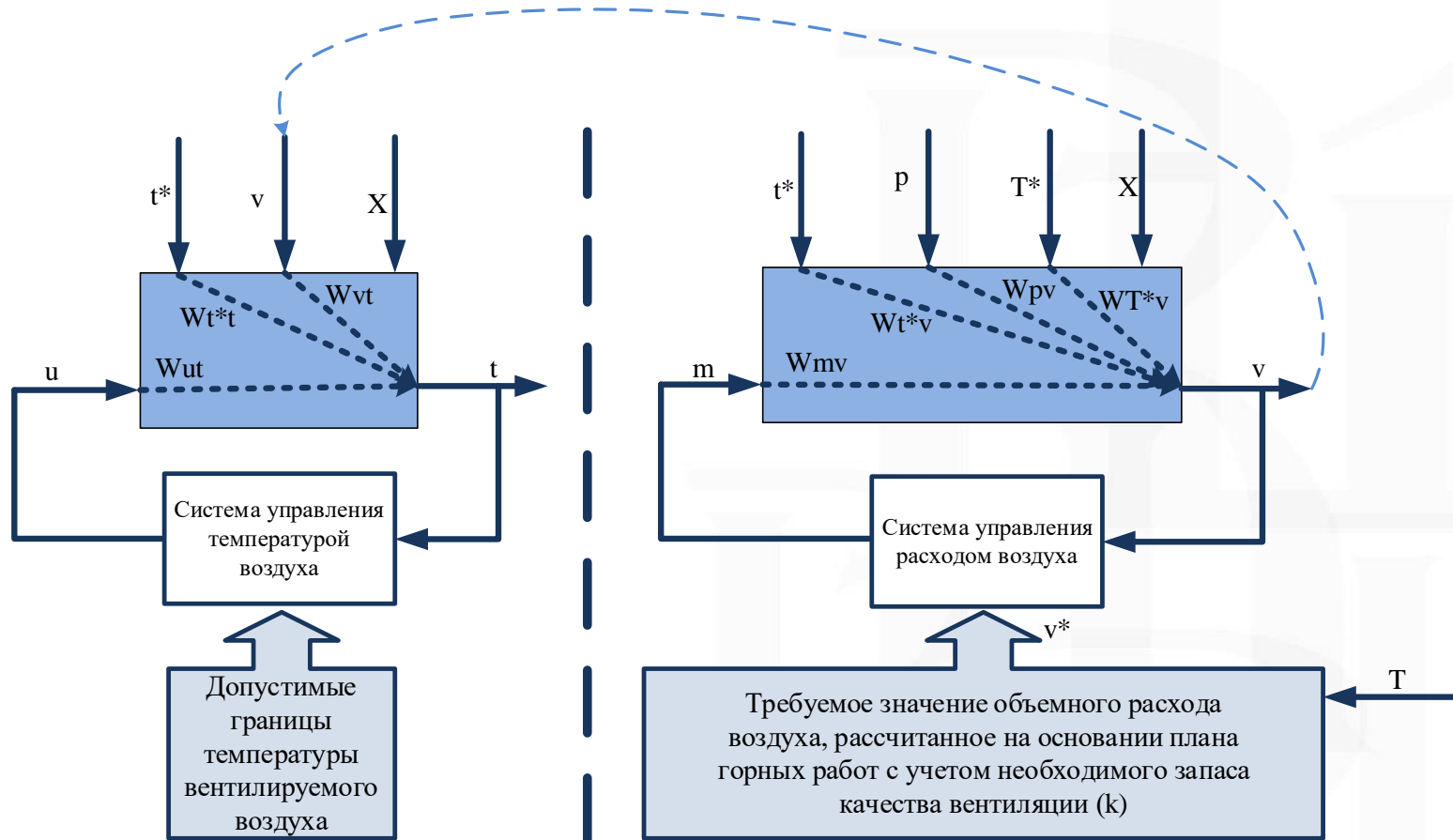
Измеряемые возмущающие параметры:

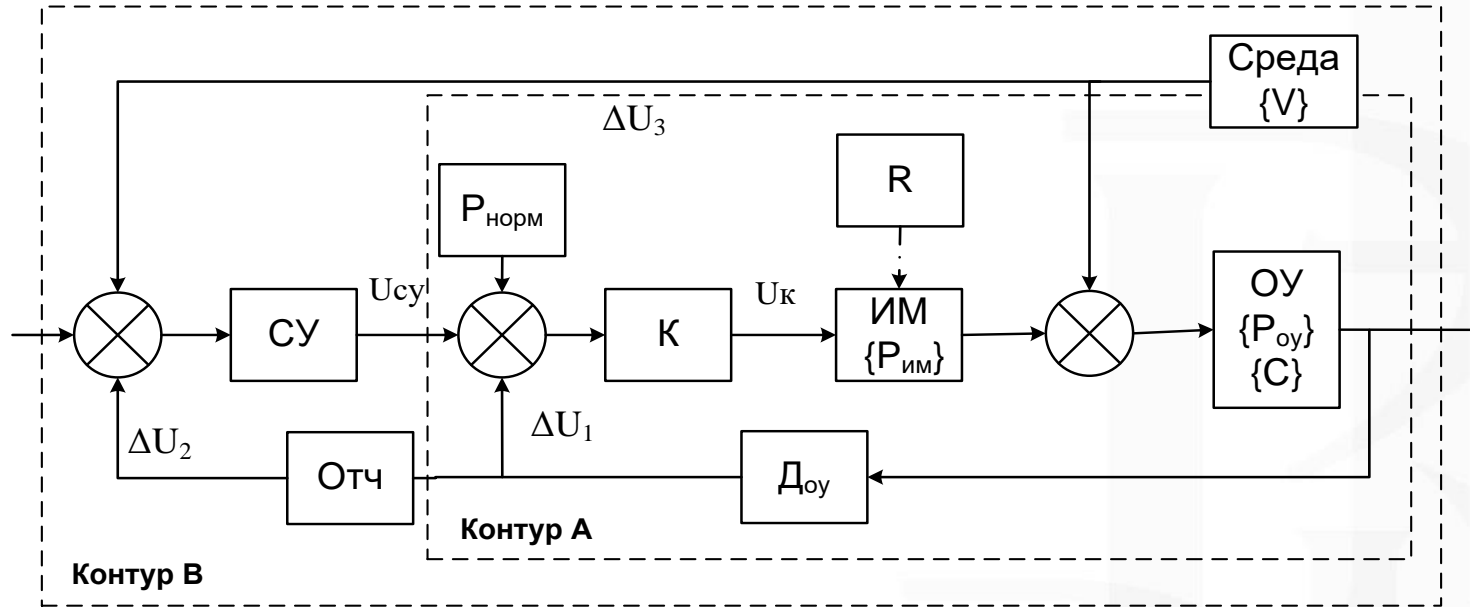
t^* – температура окружающей среды;
 p – атмосферное давление;
 T – топология рудника в соответствии с планом ведения горных работ;
 Z – тарифы на энергоресурсы;

Не измеряемые возмущающие параметры:

T^* – топология рудника в соответствии со случайными изменениями вентиляционной сети;
 X – неизвестные факторы;

Простейшая структура однокритериальной САУ проветривания





- контур А реализует обратную связь в автоматическом режиме с помощью К
- контур В реализует обратную связь в ручном режиме с помощью отчетности

СУ – субъект управления;

ОУ – объект управления, который описывается набором параметров $P_{оу} = \{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_k\}$;

$P_{норм}$ – нормативные значения параметров, характеризующих состояние объекта управления.

ИМ – исполнительный механизм, который для своей работы использует набор ресурсов $\{R\}$, под воздействием управляющего сигнала U_k меняет состояние C_i объекта управления.

К – контроллер (блок управления), используется для управления исполнительным механизмом, на основе значений параметров, полученных с датчиков ОУ, нормативных значений параметров $P_{норм}$ и управляющего воздействия U_{cy} .

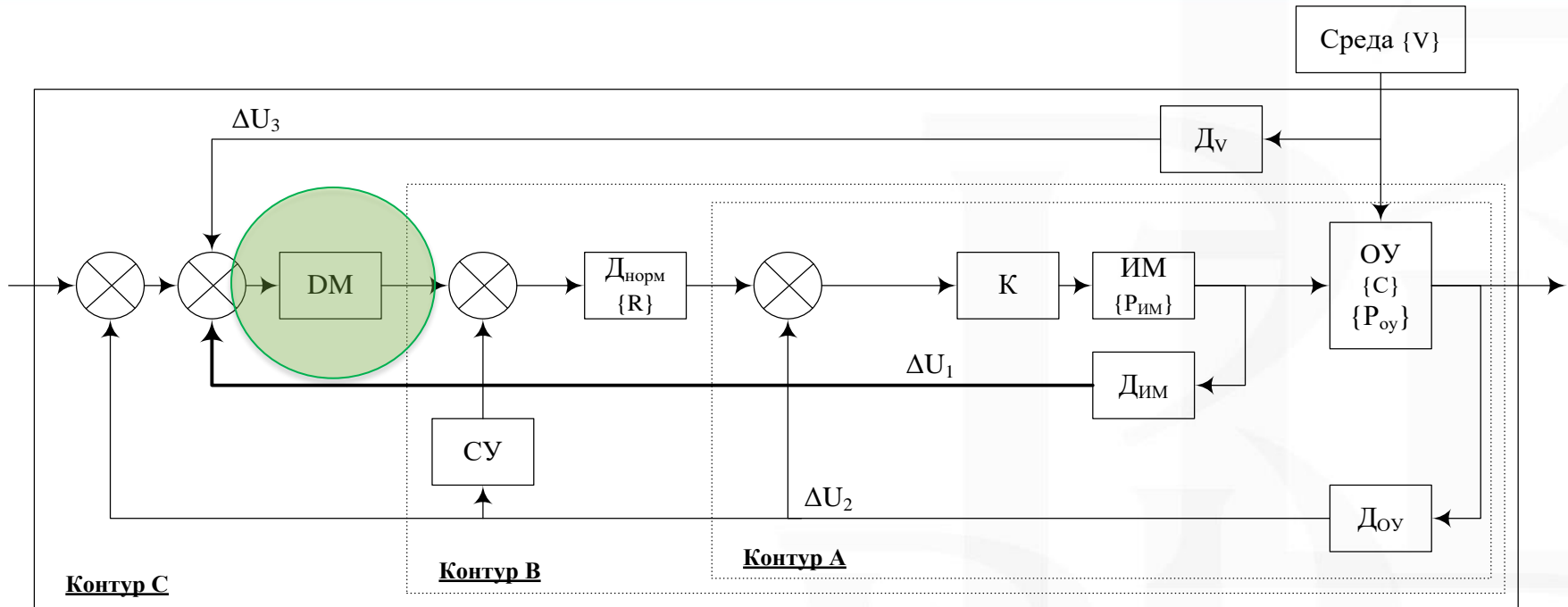
$\{V\}$ – параметры внешней среды.

$D_{оу}$ – датчики для измерения параметров объекта управления.

Отч – система отчетности, которую субъект управления использует для получения информации об ОУ.

- ΔU_1 – воздействие, поступающее с датчиков объекта управления и отражающее его изменения.
- ΔU_2 – воздействие, поступающее к субъекту управления из системы отчетности.
- ΔU_3 – воздействие, поступающее из внешней среды.

Введение блока оптимизации



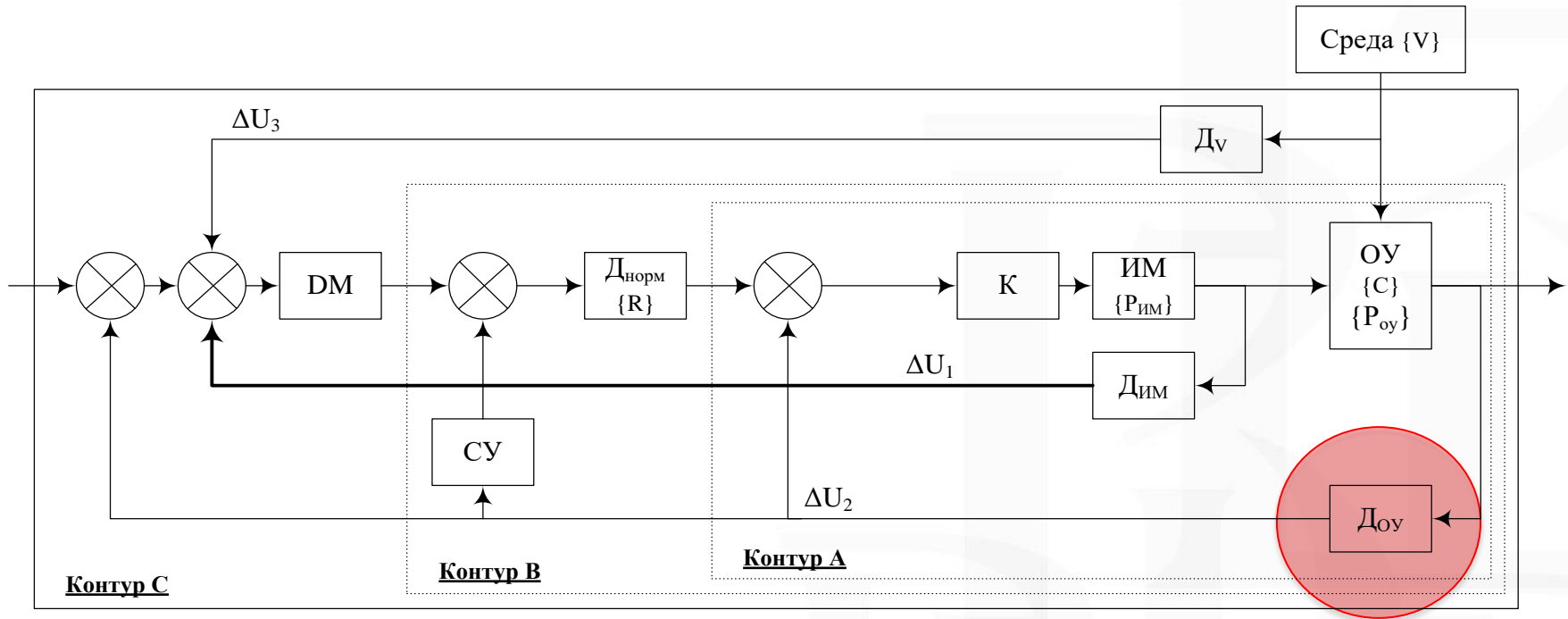
$$G1 \subset P_{оу} \times P_{им}$$

$$G2 \subset P_{оу} \times V$$

- $V, P_{оу}, P_{им}$ – имеют различные законы изменения во времени
- зависимость $P_{оу}$ от $P_{им}$ и V не очевидна
- система обладает инерционностью, что не позволяет быстро изменить $P_{оу}$ при изменении V
- нормативные значения не всегда соответствует реальным условиям, зависящим от V и состояния $ОУ$

Таким образом, достижение целей Ц1 и Ц2 необходимо добиться установление значений параметров объекта управления $P_{оу}$ и $P_{им}$ в соответствии с нормативными значениями $P_{норм}$, Ц3 можно обеспечить, минимизируя затраченные ресурсы R . Это можно сделать путем введения в схему блока работы с данными - DM

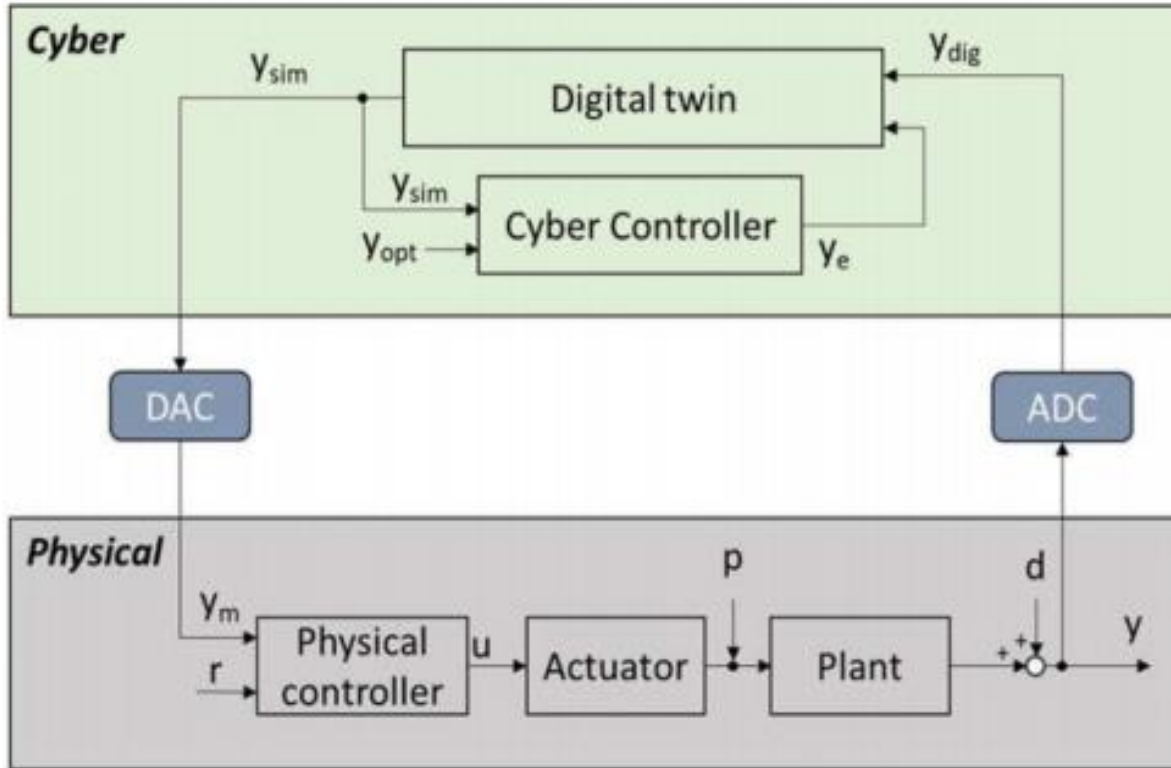
Задачи блока оптимизации



Задачи DM:

- поиск зависимостей между параметрами исполнительных механизмов $P_{им}$ и параметрами ОУ $P_{оу}$
- поиск зависимостей между возмущениями внешней среды V и параметрами ОУ $P_{оу}$
- прогнозирование значений параметров $P_{оу}$ и $P_{им}$, что поможет заранее выставить нужные значения с учетом инерционности системы
- автоматическое выставление пороговых значений $P_{норм}$
- непрерывная адаптация к изменяющимся условиям (к динамике)
- работа в условиях цифрового двойника

Использование цифрового двойника в контуре обратной связи



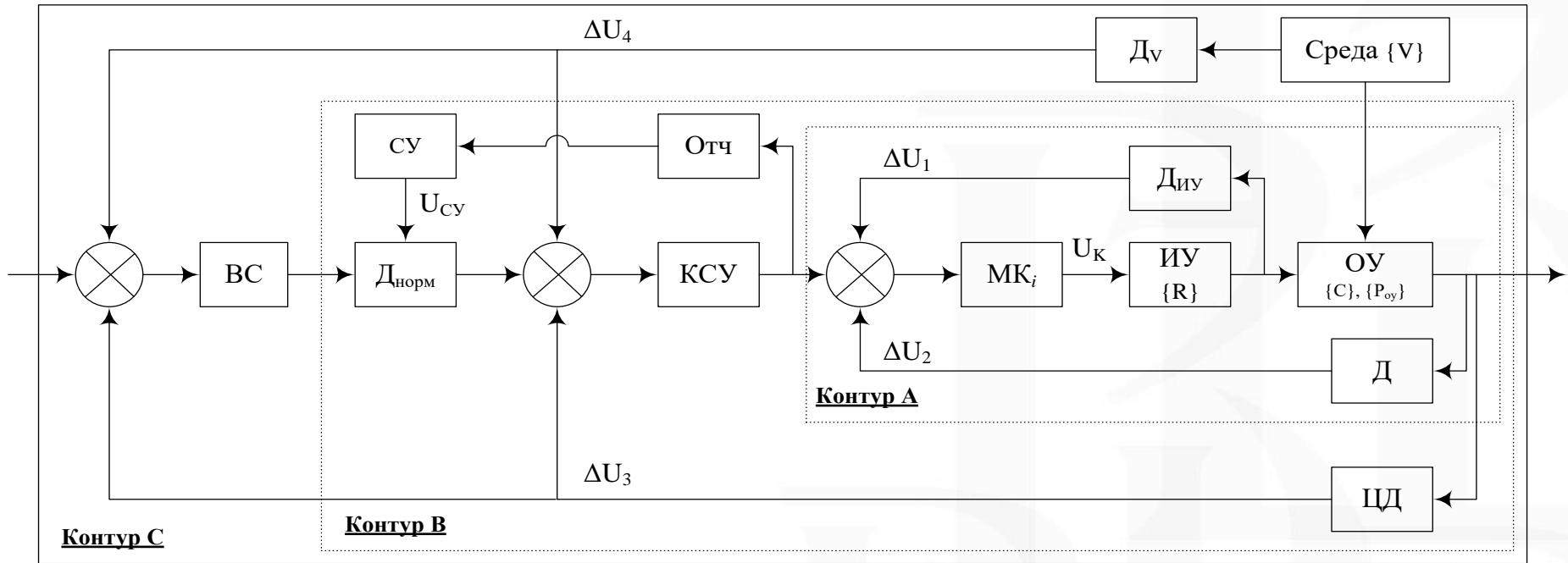
Состав цифрового двойника:

- БД временных рядов
- Реляционная БД
- Имитационная модель процесса проветривания в нормальном и аварийном режимах работы

Стек технологий:

- InfluxDB
- Postgres
- OpenModelica

[Nikolakis N., 2012]



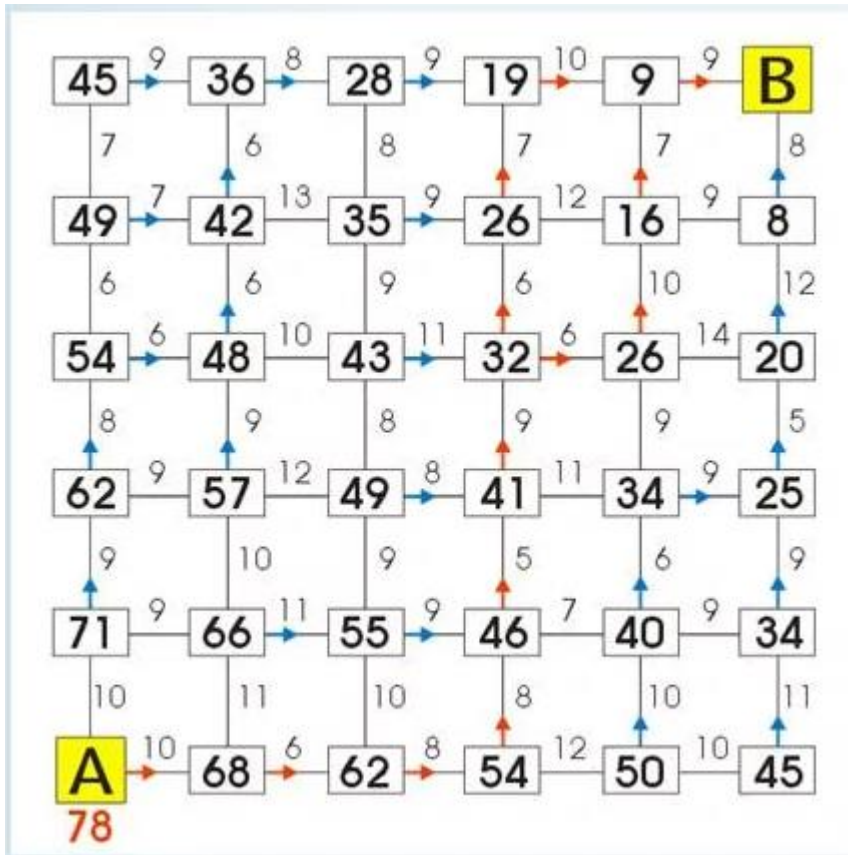
Элементы:

- Блок анализа данных и оптимизации реализуется на базе ВС – вычислительного сервера
- В обратной связи используются данные от ЦД – цифрового двойника

1. Расчет базового уровня (baseline) требуемой производительности ГВУ по данным от специалистов по энергоаудиту и планам горных работ на 3 года
2. Прогнозирование энергопотребления ГВУ и КУ на сутки вперед
3. Прогнозирование погодных условий на сутки вперед
4. Прогнозирование изменения топологии сети (режима горных работ)
5. Расчет потенциала изменения производительности ГВУ, который показывает насколько может быть увеличена / уменьшена текущая производительность в течение суток с шагом 15 минут (96 значений за сутки) с учетом прогнозов
6. Расчет управляющих сигналов для передачи их в имитационную модель с шагом по 15 минут (96 значений)
7. Обучение алгоритма динамической оптимизации на полученных управляющих сигналах
8. Расчет требуемой производительности ГВУ по данным имитационной модели на сутки вперед с шагом по 15 минут (96 значений) в условиях эксперимента

Управляющие сигналы (параметр производительности ГВУ) должны быть выстроены в последовательность на сутки вперед

Иллюстрация задачи динамического программирования



Это классическая постановка, где нам известны веса (эффекты), получаемые на каждом шаге управления

В реальной системе управления проветриванием таких весов нет, поэтому мы опираемся на аппроксимированные значения

Аппроксимация должны быть реализована на основе методов машинного обучения, тк у нас нет адекватной математической модели

Нам важно научиться выбирать правильную «траекторию» управления

Основные задачи НУГ на 2021 г.

1. Обзор концепций, технологий цифровых двойников технологического оборудования и процессов, методов оптимизации параметров систем управления (Салтыкова АД).
2. Разработка упрощенной архитектуры промышленной киберфизической системы управления проветриванием с цифровым двойником (Селина АД).
3. Анализ факторов, влияющих на процесс проветривания подземных горнодобывающих предприятий (Селина АД).
4. Разработка модели регулирования режимов работы главной вентиляторной установки с учетом действия общерудничной естественной тяги (Селиванов ВА).
5. Разработка базового алгоритма дискретного управления проветриванием в соответствии с комплексным критерием оптимальности на основе сценариев ("как есть") (Горшков ОВ).
6. Синтез обобщенной структурной схемы системы оптимального управления процессом проветривания с цифровым двойником (Павлов ВА).
7. Разработка алгоритма управления на основе аппроксимированного динамического программирования ADP с использованием технологии машинного обучения с подкреплением и цифрового двойника ("как должно быть") (Черницын ИА).
8. Имитационное моделирование процессов проветривания в Modelica, обучение контура системы управления с ADP (Селиванов ВА).
9. Интеграция ИТ решений на базе InfluxData, подключение Modelica и Python к InfluxDB (Горшков ОВ).
10. Сравнительный анализ результатов работы базового алгоритма и ADP по комплексному критерию оптимальности работы системы проветривания (Горшков ОВ).



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Спасибо
за внимание!

А.В. Кычкин, к.т.н., зав. НУЛ МЭИ, НИУ ВШЭ Пермь