



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Факультет экономики, менеджмента и  
бизнес-информатики

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Кычкин Алексей Владимирович,  
руководитель проекта,  
заведующий НУЛ МЭИ  
НИУ ВШЭ - Пермь

Пермь, 2021



# О ПРОЕКТЕ

---

Тема: Динамическая оптимизация параметров контура управления киберфизической системы проветривания подземного горнодобывающего предприятия. № 21-04-039

Конкурс исследовательских проектов научно-учебных групп (НУГ)

## **Команда проекта:**

1. Кычкин Алексей Владимирович
2. Горшков Олег Владимирович
3. Селиванов Владислав Александрович
4. Павлов Виталий Андреевич
5. Селина Анна Дмитриевна
6. Черницин Игорь Александрович
7. Салтыкова Анастасия Дмитриевна



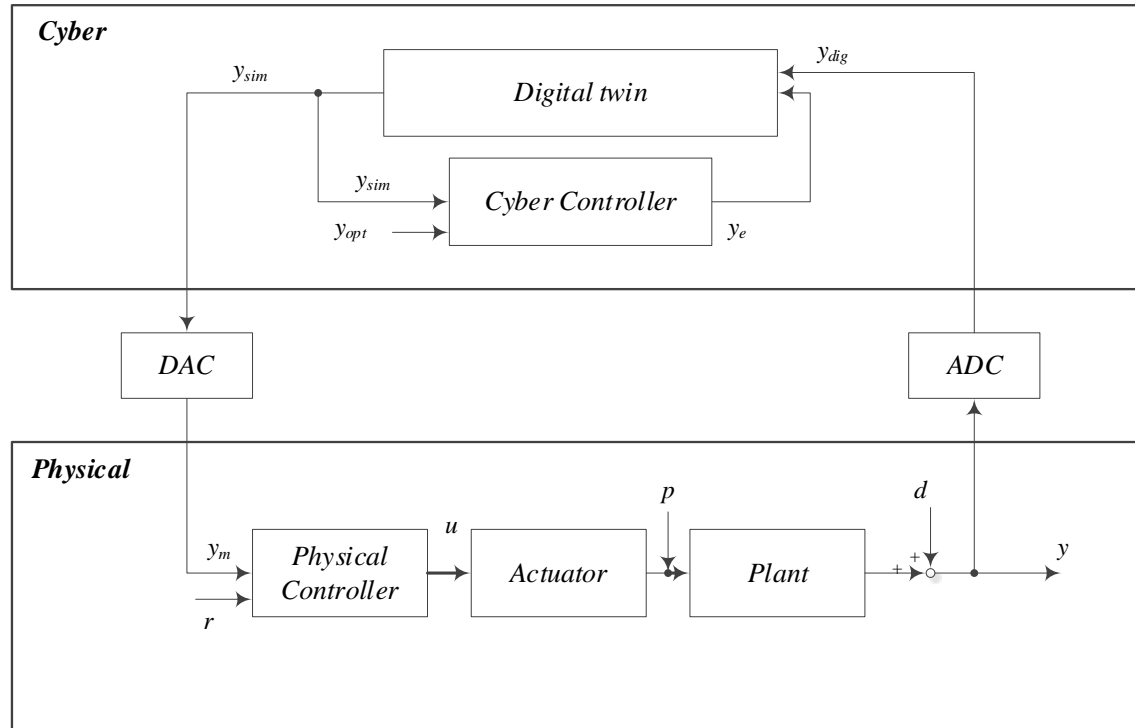
# ЗАДАЧИ

---

1. Обзор концепций, технологий цифровых двойников технологического оборудования и процессов, методов оптимизации параметров систем управления.
2. Разработка упрощенной архитектуры промышленной киберфизической системы управления проветриванием с цифровым двойником.
3. Анализ факторов, влияющих на процесс проветривания подземных горнодобывающих предприятий.
4. Расчет комплексного критерия оптимальности работы системы проветривания при использовании цифрового двойника.
5. Разработка модели регулирования режимов работы главной вентиляторной установки с учетом действия общерудничной естественной тяги.
6. Разработка базового алгоритма дискретного управления проветриванием в соответствии с комплексным критерием оптимальности на основе сценариев ("как есть").
7. Постановка задачи динамической оптимизации процесса управления проветриванием.
8. Синтез обобщенной структурной схемы системы оптимального управления процессом проветривания с цифровым двойником.
9. Разработка алгоритма управления на основе аппроксимированного динамического программирования ADP с использованием технологии машинного обучения с подкреплением и цифрового двойника ("как должно быть").
10. Имитационное моделирование процессов проветривания в Modelica, обучение контура системы управления с ADP.
11. Сравнительный анализ результатов работы базового алгоритма и ADP по комплексному критерию оптимальности работы системы проветривания.

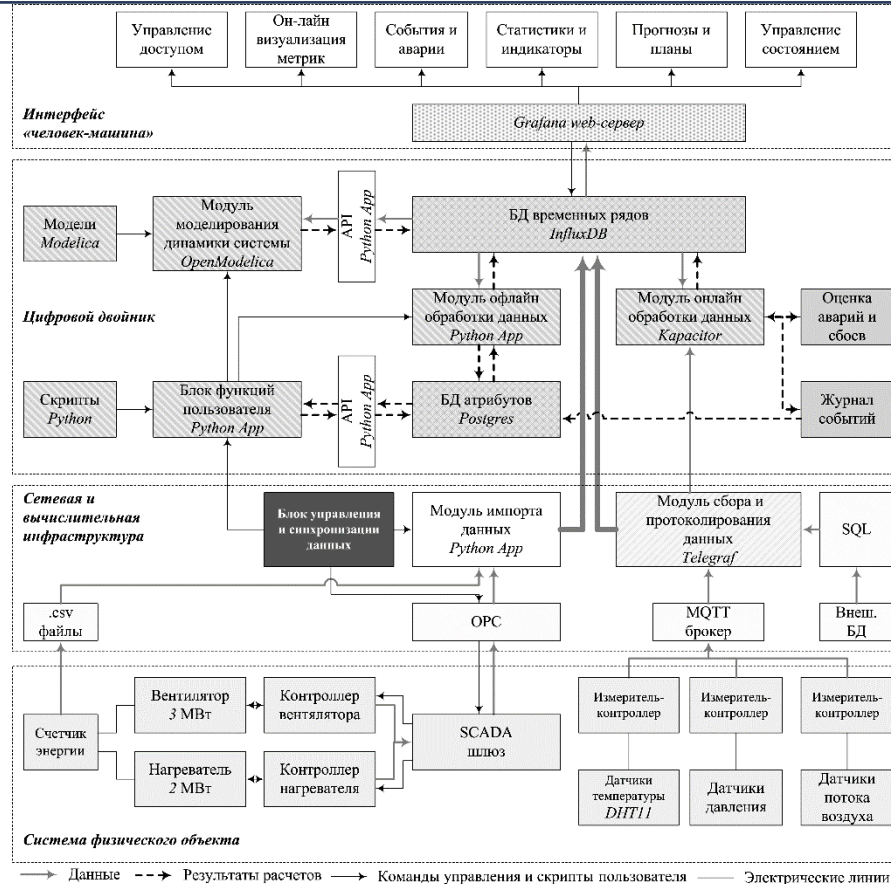


# ЗАДАЧА 1. ОБЗОР КОНЦЕПЦИЙ, ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОЦЕССОВ, МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ





# ЗАДАЧА 2. РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ С ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКОМ





### ЗАДАЧА 3. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ПРОВЕТРИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

---

Измеряемые возмущающие параметры:

- $t^*$  – температура окружающей среды;
- $p$  – атмосферное давление;
- $T$  – топология шахты в соответствии с процессом разработки месторождения;
- $Z$  – тарифная сетка;

Не измеряемые возмущающие параметры:

- $T^*$  – топология шахты в соответствии со случайными изменениями вентиляционной сети (например, поршневой эффект от движущегося транспорта, подъемных сосудов и т.д.);

Контролируемые параметры:

- $Q$  – объемный расход;
- $t$  – температура воздуха;
- $q$  – концентрации вредных примесей;
- $E$  – энергопотребление;

Управляющие параметры:

- $m$  – управляющее воздействие подсистемы ГВУ;
- $s_1...s_n$  – положение управляемых вентиляционных дверей и состояние вспомогательных вентиляторов;
- $u$  – управление ШКУ



## ЗАДАЧА 4. РАСЧЕТ КОМПЛЕКСНОГО КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПРОВЕТРИВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

---

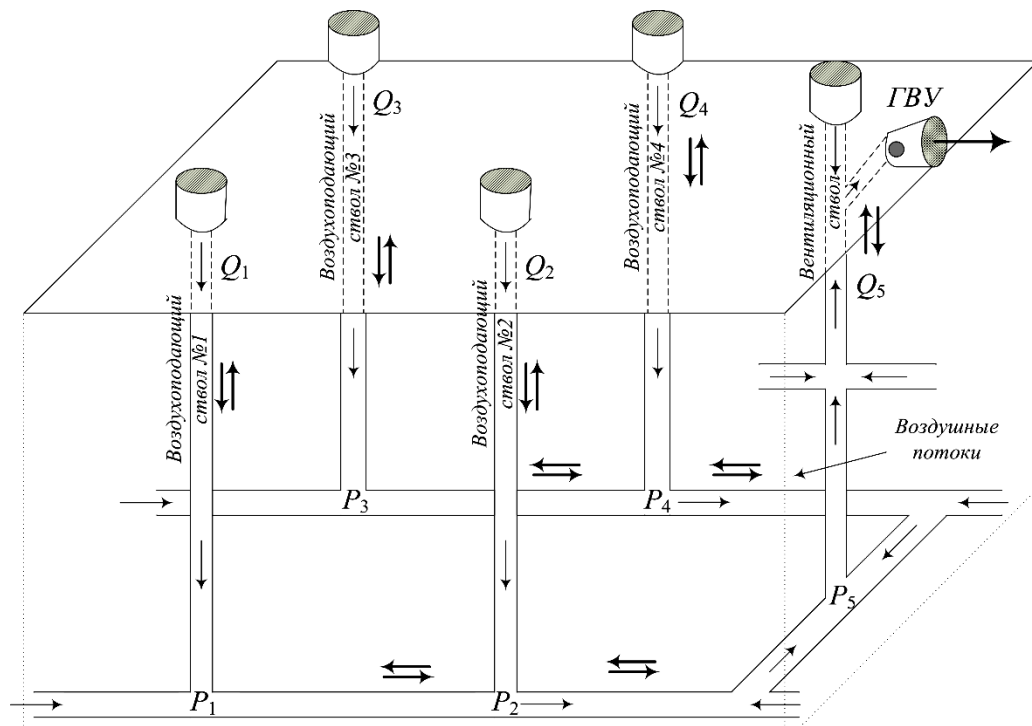
Последовательность  $\pi = \{\mu_0, \dots, \mu_{N-1}\}$  - назовем как «стратегия» или закон управления (*policies*), как набор правил выбора управляющих воздействий  $u_k$  для каждого момента времени  $k$  и каждого допустимого состояния процесса проветривания  $x_k$ . Тогда при выбранной стратегии задача динамической оптимизации процесса проветривания будет заключаться в поиске минимальной ожидаемой стоимости затрат на энергоресурсы:

$$J_{\pi}(x_0) = E \left\{ g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k, w_k) \right\} \rightarrow \min$$

Стоит отметить, что при оптимизации процесса проветривания на интервале длиной  $N$  шагов, только на последнем шаге перед переходом процесса проветривания в оконечное состояние можно принять решение о выборе наилучшего управляющего воздействия, не принимая во внимание последующие моменты времени.



# ЗАДАЧА 5. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГЛАВНОЙ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ ОБЩЕРУДНИЧНОЙ ЕСТЕСТВЕННОЙ ТЯГИ







# ЗАДАЧА 6. РАЗРАБОТКА БАЗОВОГО АЛГОРИТМА ДИСКРЕТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ В СООТВЕТСТВИИ С КОМПЛЕКСНЫМ КРИТЕРИЕМ ОПТИМАЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ СЦЕНАРИЕВ ("КАК ЕСТЬ")

Алгоритм 1. Расчет естественной тяги, действующей между шахтными стволами

1: Процедура  $\hat{h}_{e,i}$  ( $H_{\text{от}}, S1, S2, K, \Delta P_i, Q_i, P_a, t_a$ )

2: Шаг 1. Расчет аэродинамического сопротивления воздухоподающего ствола  $R_1$

$$R_1 = \alpha_1 \cdot (K \cdot H_{\text{от}} / S1^{2,5})$$

$$\alpha_1 = 0,096138$$

$H_{\text{от}}$  – высота сообщающихся стволов, м

$$K = \begin{cases} 3,28 & \text{для клетевых стволов} \\ 3,93 & \text{для сизиковых и грузопассажирских стволов} \end{cases}$$

$S1$  – сечение воздухоподающего ствола, м<sup>2</sup>

3: Шаг 2. Расчет аэродинамического сопротивления вентиляционного ствола  $R_2$

$$R_2 = \alpha_1 \cdot (K \cdot H_{\text{от}} / S2^{2,5})$$

$$\alpha_1 = 0,096138$$

$S2$  – сечение вентиляционного ствола, м<sup>2</sup>

4: Шаг 3. Расчет аэродинамического сопротивления подземной части рудника

$$R_i = \frac{\Delta P_i \cdot N}{9,81 \cdot Q_i^2}$$

$\Delta P_i$  – разность давлений между околостольными дворами шахтных стволов, мм рт. ст.

$N$  – коэффициент пересчета давления из мм рт. ст. в Па

$Q_i$  – объемный расход воздуха, проходящего между стволами, м<sup>3</sup>/с

5: Шаг 4. Расчет плотности воздуха для воздухоподающего ствола  $\rho_1$ , кг/м<sup>3</sup> [9]

$$\rho_1 = \frac{\alpha_1 \cdot [P_a \cdot (\alpha_2 + 2 \cdot t_a - K_a \cdot H_{\text{от}})] - \alpha_4 \cdot R_1 \cdot Q_1^2 \cdot (t + t_a)}{(t + t_a) \cdot [t + t_a + H_{\text{от}} \cdot (K_a - \alpha_3)]}$$

$$\alpha_1 = 0,2325; \alpha_2 = 546,3; \alpha_3 = 0,01705; \alpha_4 = 0,0075; \tau = 273,15$$

$P_a$  – атмосферное давление наружного воздуха, мм рт. ст.

$t_a$  – температура воздуха, поступающего в ствол, °C

$K_a$  – температурный коэффициент, равный 0,00767 °C/м [10]

$R_1$  – аэродинамическое сопротивление ствола, (Н·с<sup>2</sup>)/м<sup>8</sup>

$Q_1$  – объемный расход воздуха, поступающего в ствол, м<sup>3</sup>/с

6: Шаг 5. Расчет плотности воздуха для вентиляционного ствола  $\rho_2$ , кг/м<sup>3</sup>

$$A_1 = \frac{\alpha_1 \cdot (t + t_c - H_{\text{от}} \cdot (\alpha_3 - K_B))}{t + t_c - K_B \cdot H_{\text{от}}}$$

$$\alpha_1 = 0,2325; \alpha_3 = 0,01705; \tau = 273,15$$

$t_c$  – температура воздуха в околостольном дворе ствола, °C

$R_2$  – аэродинамическое сопротивление подземной части рудника,

(Н·с<sup>2</sup>)/м<sup>8</sup>

$R_3$  – аэродинамическое сопротивление ствола, (Н·с<sup>2</sup>)/м<sup>8</sup>

$K_B$  – температурный коэффициент, равный 0,00923 °C/м [10]

$Q_B$  – объемный расход воздуха, исходящий из ствола, м<sup>3</sup>/с

$$8: A_2 = \frac{P_a + \alpha_3 \cdot \rho_1 \cdot H_{\text{от}} - \alpha_4 \cdot (R_1 + R_2) \cdot Q_B^2}{t + t_c}$$

$$\alpha_3 = 0,0735; \alpha_4 = 0,0075; \tau = 273,15$$

$$9: A_3 = \frac{P_a + \alpha_3 \cdot \rho_1 \cdot H_{\text{от}} - \alpha_4 \cdot (R_1 + R_2 + R_3) \cdot Q_B^2}{t + t_c - K_B \cdot H_{\text{от}}}$$

$$\alpha_3 = 0,0735; \alpha_4 = 0,0075; \tau = 273,15$$

$$10: \rho_2 = A_1 \cdot [A_2 + A_3]$$

11: Шаг 6. Расчет естественной тяги  $\hat{h}_{e,i}$  между  $i$ -ой парой стволов, Па

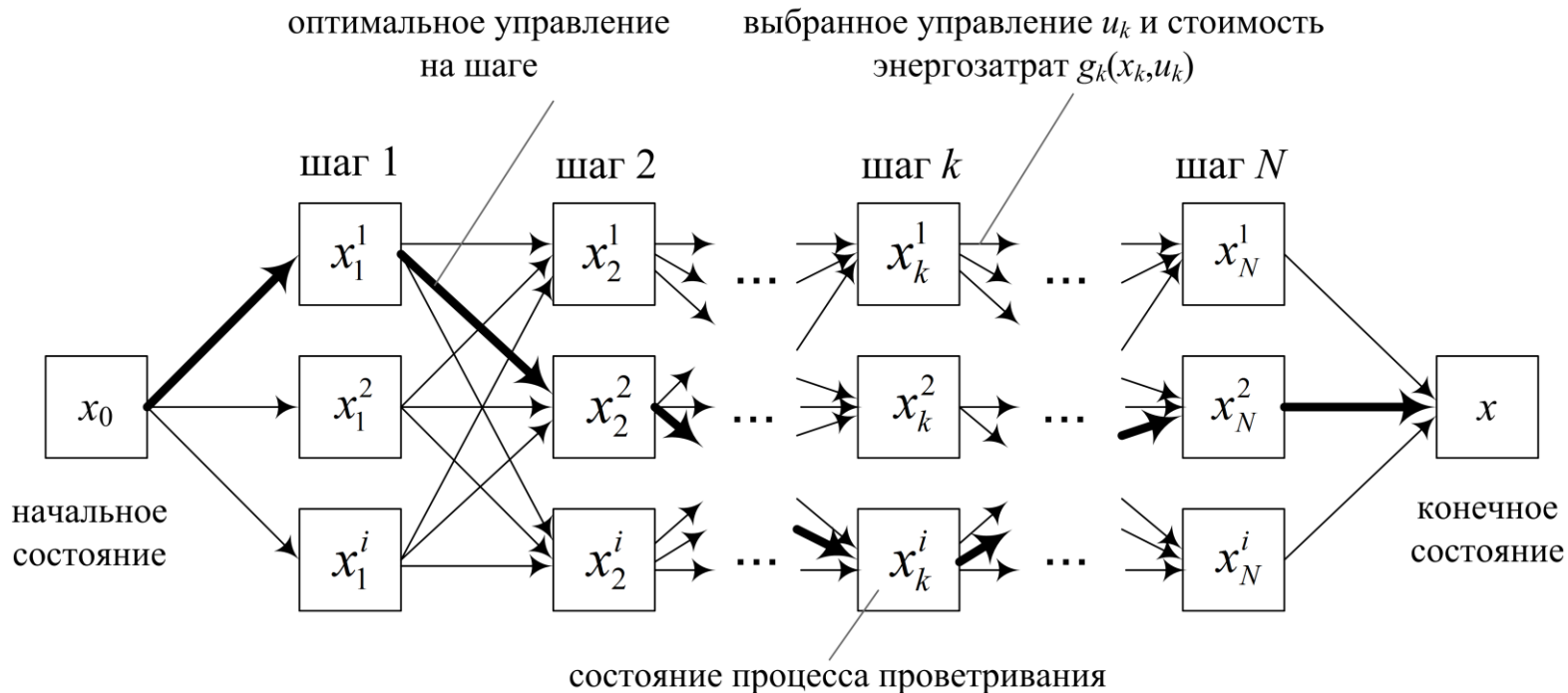
$$\hat{h}_{e,i} = (\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot H_{\text{от}}$$

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2 - \text{ускорение свободного падения, м}^2/\text{с}^2$$

12: Вывод  $\hat{h}_{e,i}$



# ЗАДАЧА 7. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ

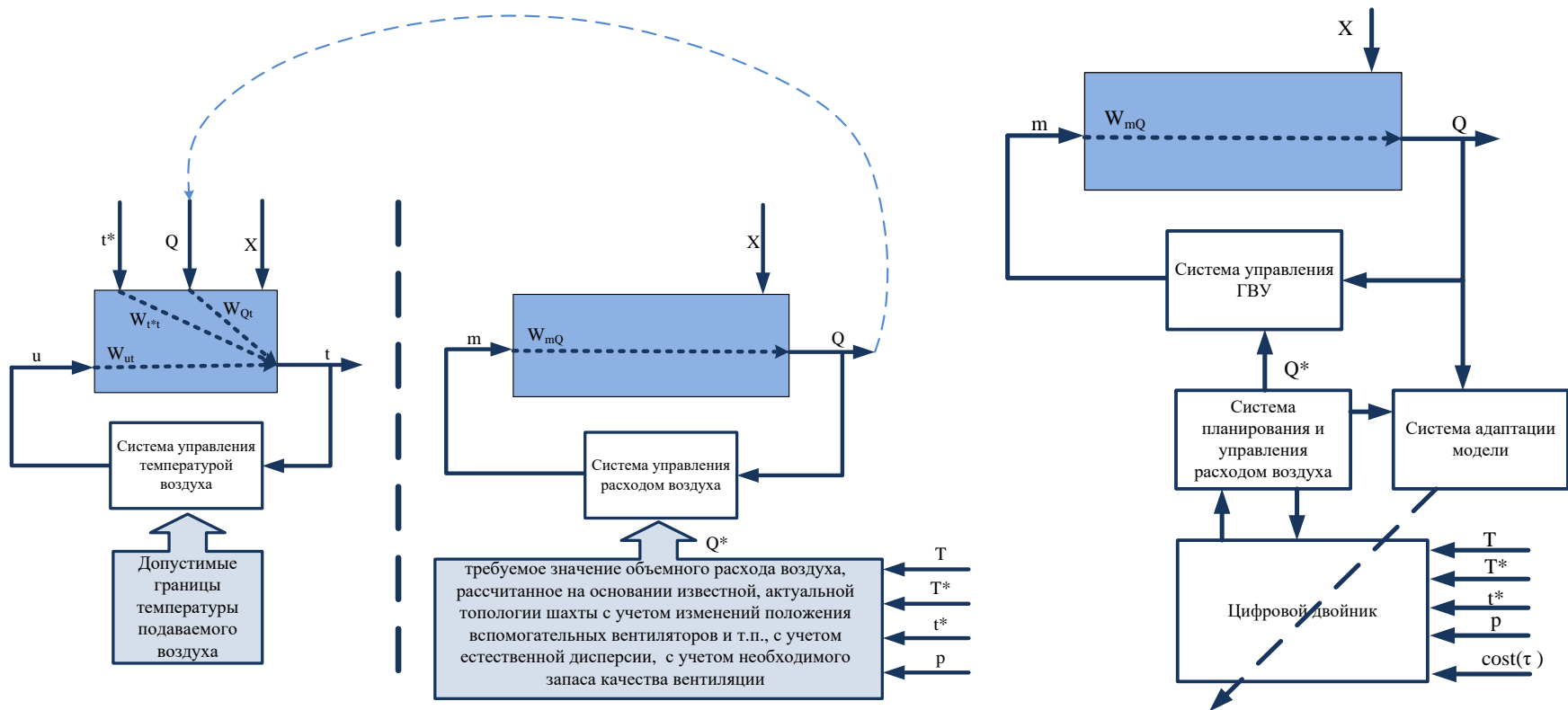


процесс управления - детерминированный

возмущение  $w_k$  принимает одно конкретное значение



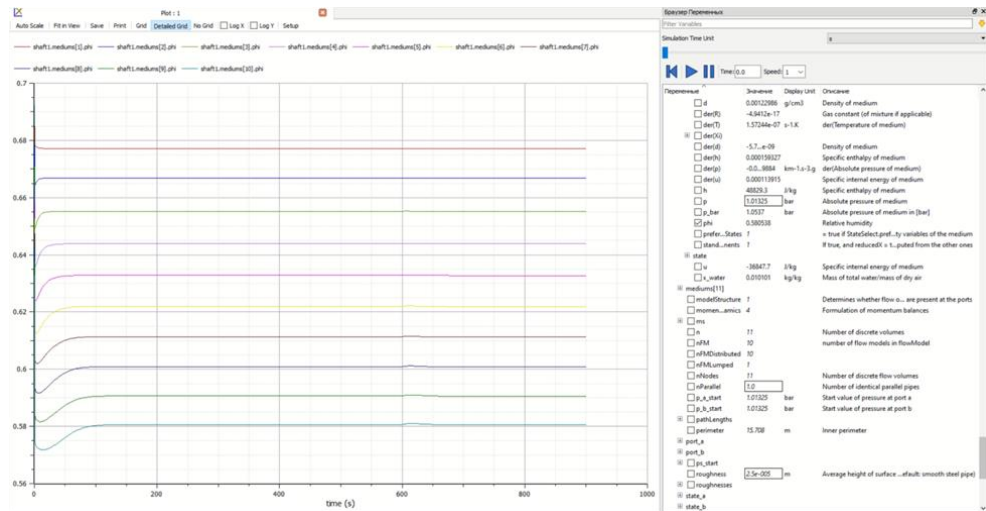
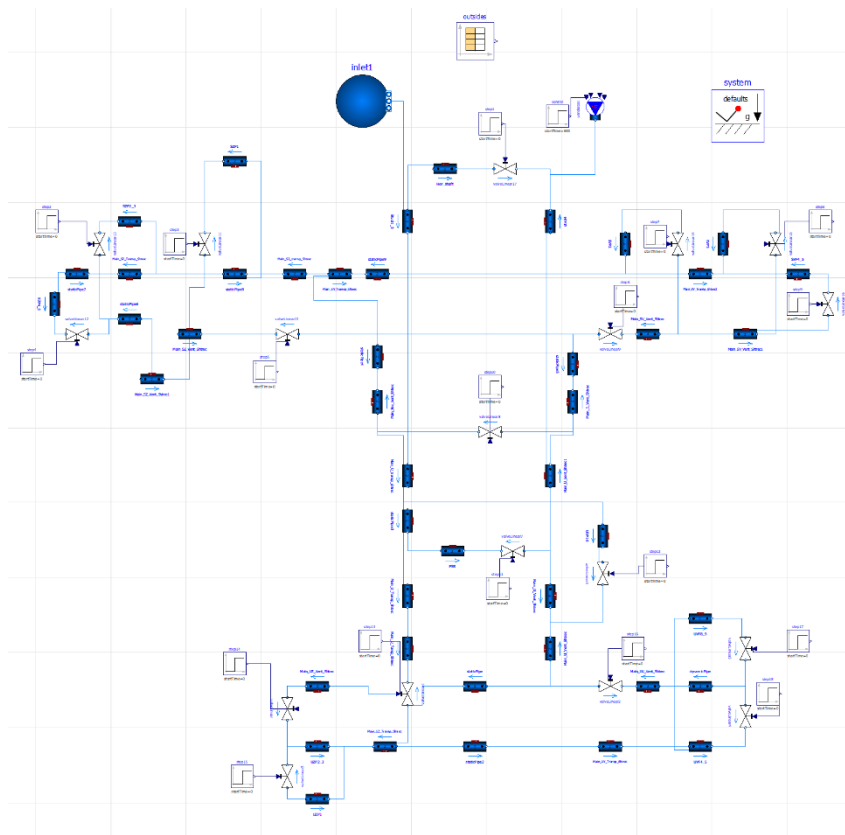
# ЗАДАЧА 8. СИНТЕЗ ОБОБЩЕННОЙ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ СИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРОВЕТРИВАНИЯ С ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКОМ





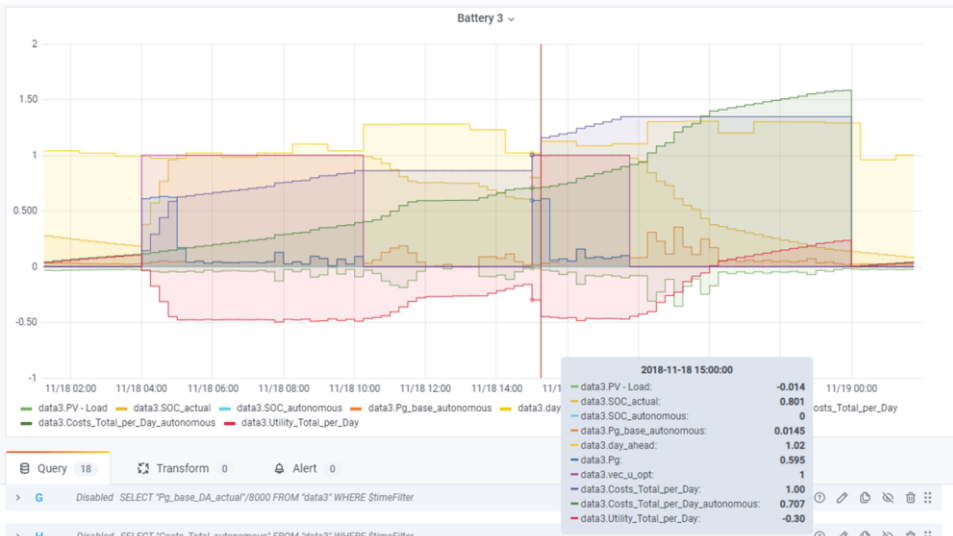
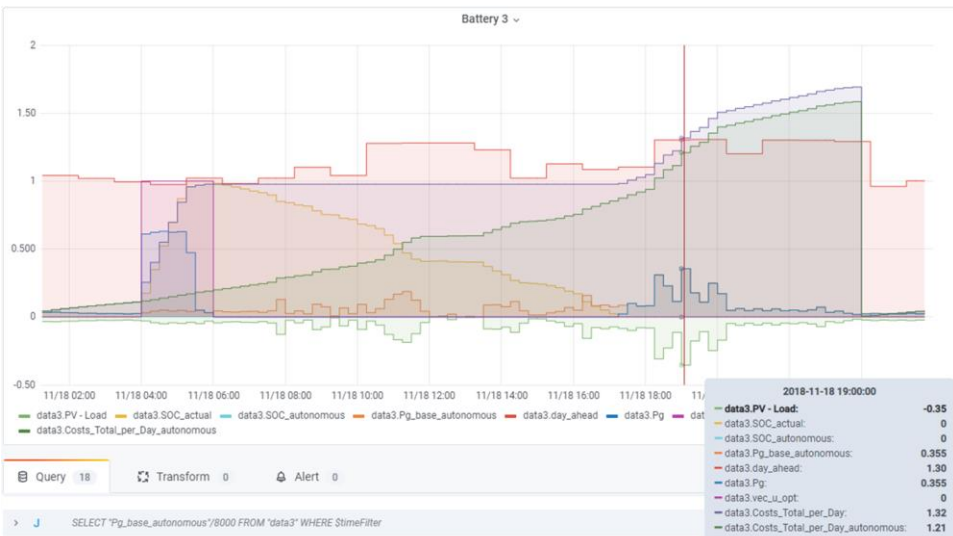


# ЗАДАЧА 10. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОВЕТРИВАНИЯ В MODELICA, ОБУЧЕНИЕ КОНТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ADP





# ЗАДАЧА 11. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ БАЗОВОГО АЛГОРИТМА И ADR ПО КОМПЛЕКСНОМУ КРИТЕРИЮ ОПТИМАЛЬНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПРОВЕТРИВАНИЯ





НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Факультет экономики, менеджмента и  
бизнес-информатики

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Кычкин Алексей Владимирович  
+7 952 644 2146  
avkychkin@gmail.com

Пермь, 2021