

Отчет о работе над задачей профиля "Ядерные Технологии" Национальной Технологической Олимпиады

Команда "InnoClear"

17-21 апреля 2023

1 Математическая модель

Наша модель основывается на законе сохранения массы: выполняется выражение

$$\frac{dm}{dt} = \rho_{wat}Q_{in} - \rho_{work}Q_{evap} - \rho_{work}Q_{out}$$

где $\frac{dm}{dt}$ - изменение массы в системе в единицу времени; ρ_{wat} , ρ_{work} - плотности, соответственно, поступающей (деаэрируемой) и рабочей (деаэрированной) воды; $Q_{in}, Q_{evap}, Q_{out}$ - поток воды (объем воды в единицу времени), соответственно, поступающей через входной клапан, выпариваемой и выводимой через выходной клапан.

В свою очередь, $Q_{in} = \frac{S_{in}}{S_{inmax}} \cdot Q_{inmax}$, $Q_{evap} = \frac{L}{L_{nom}} \cdot Q_{evapnom}$ и (по закону Бернулли) $Q_{out} = \frac{S_{out}}{S_{outmax}} \cdot S_{outmax} \cdot \sqrt{2gL} = S_{out} \cdot \sqrt{2gL}$.

В выражениях выше g - ускорение свободного падения; S_{in} , S_{inmax} , S_{out} , S_{outmax} - площади клапанов соответственно входного в текущий момент, входного максимально возможная, выходного в текущий момент, выходного максимально возможная; L , L_{nom} - значения высоты воды в деаэраторе в текущий момент и номинальное; Q_{inmax} , $Q_{evapnom}$, Q_{outmax} - поток воды: поступающей (максимально возможное значение), выпариваемой (номинальное значение) и выходящей (максимально возможное значение), соответственно.

Преобразовав также левую часть уравнения (масса равна произведению плотности и объема), обозначив площадь дна деаэратора через S_{bot} , получим итоговое дифференциальное уравнение относительно высоты воды L :

$$\rho_{work} \cdot S_{bot} \cdot \frac{dL}{dt} = \rho_{wat} \cdot \frac{S_{in}}{S_{inmax}} \cdot Q_{inmax} - \rho_{wat} \cdot \frac{L}{L_{nom}} \cdot Q_{evapnom} - S_{out} \cdot \sqrt{2gL}$$

Это же уравнение, представленное в разностной форме (полученное по методу Эйлера):

$$L_i = L_{i-1} + dt \left((\rho_{wat} \cdot \frac{S_{in}}{S_{inmax}} \cdot Q_{inmax} - \rho_{wat} \cdot \frac{L}{L_{nom}} \cdot Q_{evapnom} - S_{out} \cdot \sqrt{2gL}) / (\rho_{work} S_{bot}) \right)$$

1.1 Алгоритм управляющего воздействия

Для управления верхним (входным) клапаном, основываясь на текущем и целевом уровне воды в деаэраторе регулятор выдаёт значение процента открытия входного клапана (от максимально возможного). Для обеспечения плавности регулирования, используется сглаживание управляющего воздействия при помощи упрощенного фильтра Калмана: реальное значение открытия входного клапана A_i на цикле i определяется через значение на предыдущем цикле A_{i-1} , значение, выдаваемое регулятором B_i и коэффициент сглаживания α как

$$A_i = (1 - \alpha)A_{i-1} + \alpha B_i$$

Для управления нижним (выходным) клапаном, на основе текущего и целевого значений выходного потока воды регулятор выдаёт значение процента открытия клапана (от максимально возможного). Во избежание полного опустошения деаэратора при его заполнении, устанавливается ограничение на открытие выходного клапана, которое действует, пока вода не поднимется до определённого уровня.

Также происходит дополнительная проверка безопасности. Если уровень воды превышает максимальный допустимый, то блокируется подача воды из верхнего клапана. Аналогично, если уровень воды ниже допустимого, то блокируется нижний клапан.

2 Параметры в базе данных

В общей сложности в базе данных содержатся 33 значения, среди которых:

- Управляющие переменные: флаги для управления симуляцией (её запуск/остановка/сброс, переключение на ручное управление, ...) и задаваемые оператором параметры (например, целевое значение уровня воды, в ручном режиме - управление люками, ...)
- Переменные состояния системы: текущие характеристики, такие как текущий уровень воды в деаэраторе, входного/выходного потока, ...
- Статические параметры модели, например, площадь дна деаэратора, отношение плотностей обычной и рабочей воды, ...
- Вспомогательные переменные, вычисление которых требует использования функций, недоступных в MikBASIC, например, скорость выходного потока, площадь выходной трубы, ...

Полный список переменных:

Ном...	Название	Описание	Посл.Знач...	Статус	Источник	Таймаут
A0	dT	Расчетный шаг по времени (мс)	16	0	Такт работы системы	60000
A1	On/Off	Включить или выключить симуляцию	1	0		0
A2	UP_pers_closed	Перекрыт ли вручную верхний люк	0	0		0
A3	UP_is_closed	Перекрыт ли верхний люк	0	0	Calc. [\$B2\$+\$B45\$-\$B2\$*\$B45\$]	0
A4	UP_is_auto	Автоматическое или ручное управление верхним люком	1	0		0
A5	DOWN_is_closed	Перекрыт ли нижний люк	0	0	Calc. [\$B7\$+\$B46\$-\$B7\$*\$B46\$]	0
A6	DOWN_is_auto	Автоматическое или ручное управление нижним люком	1	0		0
A7	DOWN_pers_closed	Перекрыт ли вручную нижний люк	0	0		0
A8	L	Текущий уровень воды в деаэраторе (м)	1.66088	0		0
A9	Qin	Текущее значение потока входящей воды (м ³ /с)	0.00418804	0		0
A10	Qvp	Текущее значение потока выпариваемой воды (м ³ /с)	4.07242e-005	0		0
A11	Qout	Текущее значение потока выходящей воды (м ³ /с)	0.0193041	0		0
A12		###	38			0
A13	Qin_display	Отображаемое значение потока входящей воды (м ³ /час)	14.274	0	Calc. [\$B9\$*3600]	0
A14	Qvp_display	Отображаемое значение потока выпариваемой воды (м ³ /час)	0.1476	0	Calc. [\$B10\$*3600]	0
A15	Qout_display	Отображаемое значение потока выходящей воды (м ³ /час)	69.5088	0	Calc. [\$B11\$*3600]	0
A16		###	38			0
A17	L_nom	Целевое значение уровня воды в деаэраторе (м)	1.7	0		0
A18	Q_out_tg	Целевое значение потока выходящей воды (м ³ /с)	70	0		0
A19		###	38			0
A20	S_d	Площадь дна (м ²)	11.1765	0		0
A21	D_out_max	Максимальный диаметр выходной трубы (м)	0.18	0		0
A22	P_r	Отношение плотности обычной воды к рабочей (безразмерн...	1.0798	0		0
A23	g	Ускорение свободного падения (м/с ²)	9.81	0		0
A24	Q_in_max	Максимальное значение потока входящей воды (м ³ /с)	0.039	0		0
A25	Q_vp_nom	Нормированное значение потока выпариваемой воды (м ³ /с)	4.16667e-005	0		0
A26		###	38			0
A27	V_out	Скорость выходного потока (м/с)	5.7096	0	Calc. [SQRT(2*\$B23\$*ABS(\$B8\$))]	0
A28	S_out	Площадь выходной трубы (м ²)	0.00338158	0	Calc. [3.1415926*(\$B37\$/100*\$B21\$)...	0
A29	UP_TimeControl	Период контроля регулятора верхнего клапана (с)	0.005	0		0
A30	UP_Kp	Пропорциональная компонента регулятора верхнего люка	2.2	0		0
A31	UP_Ki	Интегральная компонента регулятора верхнего люка (с)	0.001	0		0
A32	UP_proc	Процент открытия верхнего клапана	11.3311	0		0
A33	UP_reg_proc	Процент открытия верхнего клапана регулятором	33.0939	0	ALGO: P01A0001	0
A34	DOWN_TimeControl	Период контроля регулятора нижнего клапана (с)	0.025	0		0
A35	DOWN_Kp	Пропорциональная компонента регулятора нижнего люка	0.2	0		0
A36	DOWN_Ki	Интегральная компонента регулятора нижнего люка (с)	0.5	0		0
A37	DOWN_proc	Процент открытия нижнего клапана	36.4538	0		0
A38	DOWN_reg_proc	Процент открытия нижнего клапана регулятором	36.4608	0	ALGO: P01A0002	0

A39			###	###		60000
A40	Alpha	Коэффициент сглаживания управляющего воздействия	0.03	0		0
A41	UP_reg_smooth	Сглаженный процент открытия верхнего клапана регулятором	95.1356	0	Calc. [(1-\$B40\$)*\$B41\$+\$B40\$*\$B3...	0
A42			###	38		0
A43	L_max	Минимальный допустимый уровень воды (м)	2	0		0
A44	L_min	Максимальный допустимый уровень воды (м)	0.5	0		0
A45	Emergency_Over	Флаг экстренной ситуации при превышении уровня воды в де...	0	0		0
A46	Emergency_Under	Флаг экстренной ситуации при низком уровне воды в деаэрат...	0	0		0
A47	Emergency	Флаг экстренной ситуации	0	0	Calc. [\$B45\$+\$B46\$-\$B45\$*\$B46\$]	0

3 Код программы

Код на MikBASIC:

```

1  REM save delta T in sec
2  dT = 0.5 rem A[0].VALUE/1000
3
4  Rem Q_in = UP_proc * Q_in_max
5  Q_IN = A[32].VALUE/100 * A[24].VALUE
6  A[9].VALUE = Q_IN
7
8  Rem Q_vp = L/L_nom * Q_vp_nom
9  Q_VP = A[8].VALUE / A[17].VALUE * A[25].VALUE
10 A[10].VALUE = Q_VP
11
12
13 Rem Q_out = V_out * S_out
14 Q_OUT = A[27].VALUE * A[28].VALUE
15 if Q_OUT > 0.1 * A[25].VALUE THEN
16 {
17   if A[8].VALUE < 0.25*A[17].VALUE THEN Q_OUT = 0.1 * A[25].VALUE
18 }
19 A[11].VALUE = Q_OUT
20
21 Rem L = L + dT* (P_r * (Q_IN - Q_VP) - Q_OUT) / Sd
22 L = A[8].VALUE + dT* (A[22].VALUE * (Q_IN - Q_VP) - Q_OUT) / A[20].VALUE
23 if L < 0 THEN L = 0
24 A[8].VALUE = L
25
26 REM Control:
27 Rem auto up
28 IF A[4].value == 1 THEN A[32].VALUE = A[41].VALUE
29 Rem auto down
30 IF A[6].value == 1 THEN A[37].VALUE = A[38].VALUE
31 Rem close up
32 IF A[3].value == 1 THEN A[32].VALUE = 0
33 Rem close down
34 IF A[5].value == 1 THEN A[37].VALUE = 0
35
36 REM Emergency situation maximum water
37 IF A[8].VALUE > A[43].VALUE THEN
38 {
39   A[3].VALUE = 1
40   A[45].VALUE = 1

```

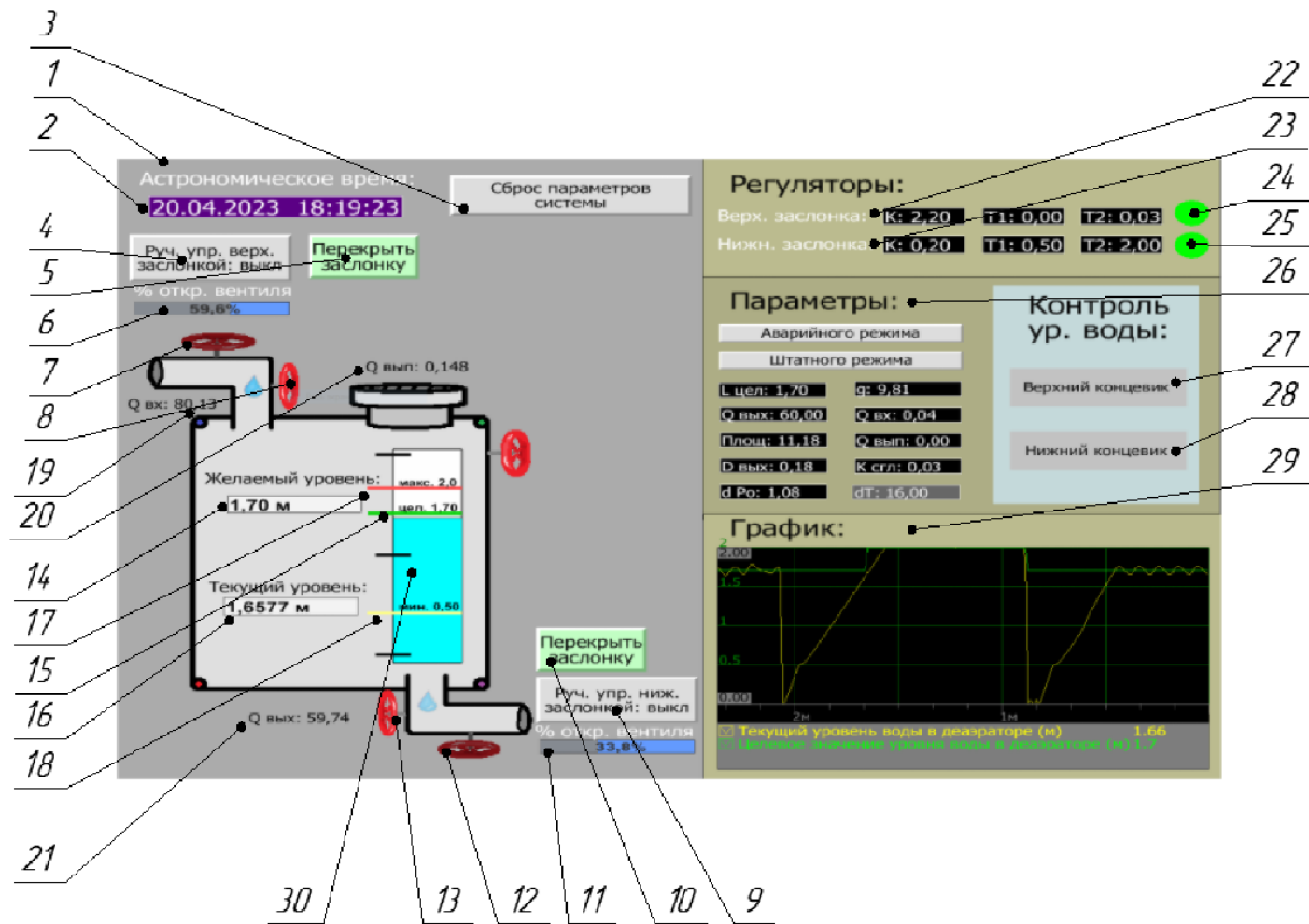
```

41 }
42 ELSE
43 {
44     A[45].VALUE = 0
45 }
46
47
48 REM Emergency situation maximum water
49 IF A[8].VALUE < A[44].VALUE THEN
50 {
51     A[5].VALUE = 1
52     A[46].VALUE = 1
53 }
54 ELSE
55 {
56     A[46].VALUE = 0
57 }
58
59 Rem RESET
60 IF A[1].VALUE == 0 THEN
61 {
62     A[8].VALUE = 0
63     A[9].VALUE = 0
64     A[10].VALUE = 0
65     A[11].VALUE = 0
66     A[45].VALUE = 0
67     A[46].VALUE = 0
68     REM reset constants
69     REM Target values
70     A[17].VALUE = 1.7
71     A[18].VALUE = 70
72     REM Emergency situations
73     A[43].VALUE = 2.0
74     A[44].VALUE = 0.5
75     REM Model params
76     A[20].VALUE = 11.1765
77     A[21].VALUE = 0.18
78     A[22].VALUE = 1.0798
79     A[23].VALUE = 9.81
80     A[24].VALUE = 0.039
81     A[25].VALUE = 0.0000416667
82     REM Control UP
83     A[29].VALUE = 0.005
84     A[30].VALUE = 2.2
85     A[31].VALUE = 0.001
86     A[40].VALUE = 0.03
87     REM Control UP
88     A[34].VALUE = 0.025
89     A[35].VALUE = 0.2
90     A[36].VALUE = 0.5
91 }

```

4 Графический интерфейс

Мы разработали для симуляции графический интерфейс, позволяющий наблюдать за значениями параметров и взаимодействовать с моделью:



К отчету прилагается файл с инструкциями по взаимодействию с разработанным интерфейсом.

5 Результаты исследований модели деаэратора при помощи построенного самостоятельно цифрового тренажера

Сравнение полученного расчетного времени заполнения деаэратора с управлением по регулятору и без регулятора:

Ручной режим		С регулятором без колебаний		С регулятором с колебаниями	
Эксперимент №	Время	Эксперимент №	Время	Эксперимент №	Время
1	26.8 сек	1	77 сек	1	28 сек
2	26.7 сек	2	77 сек	2	28 сек
3	27 сек	3	77 сек	3	28 сек

Мы пришли к выводу, что если мы хотим уменьшить управляющее воздействие в стационарном режиме, нам придется жертвовать временем выхода на стационарный уровень.

Также было проведено исследование влияния параметров модели, таких как площадь основания, максимальные диаметры труб и др. Было выяснено, что это с достаточной силой влияет на время

выхода уровня воды на рабочий, однако никак не влияет на возможность регулирования.

6 Приложения

К отчету прилагаются:

- Исходный код проекта - содержимое базы данных, исходный код и пользовательский интерфейс для взаимодействия с приложением;
- Документ с инструкциями по работе с графическим интерфейсом симуляции;
- Видео-демонстрация заполнения деаэратора до рабочего уровня с использованием регулятора на цифровом тренажере;
- Стоковое изображение лягушки (ниже).

