

1. Какими приближенными параметрами (диаметр золотника D_s , размеры перепускного окна a , жесткость пружины k) должен обладать редукционный клапан для поддержания $P_{RED} = 10$ атм?
2. Каково будет минимальное давление входе в клапан $P_{IN\ MIN}$, при котором система будет работать?
3. Промоделировать поведение редукционного клапана при ступенчатом воздействии по давлению $P_{IN} = 2 P_{IN\ MIN}$. В начальный момент времени клапан полностью закрыт. Массу золотника предположить из полученным размерам, материал – конструкционная сталь. Модель представить в виде кода C/C++.

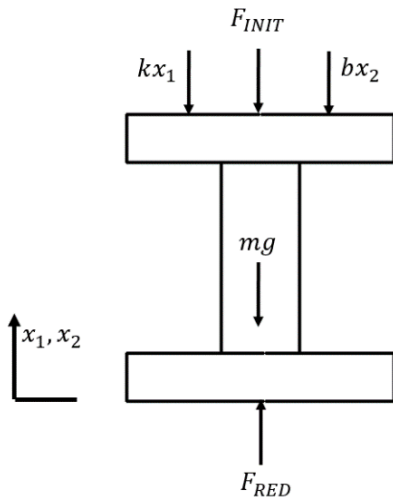
Модель редукционного клапана основана на следующих допущениях:

- если избыточное давление на входе $P_{IN} = 0$ атм, золотник опирается на буртик, при этом с помощью регулировочного винта пружина с жёсткостью k придавливает золотник к буртику с силой F_{INIT} ;
- объём редукционной камеры и каналов течения жидкости не учитывается;
- задача рассматривается в изотермической постановке;
- эффекты от дополнительного всасывания или выталкивания жидкости при движении золотника не учитываются;
- размер каналов течения жидкости в редукционной камере равен размеру перепускного окна a ;
- каналы течения жидкости в редукционной камере соединены с выходным нерегулируемым дросселем посредством соединительной арматуры стандартного диаметра (ГОСТ 11881 - 76), при этом дроссель находится в непосредственной близости к каналам течения жидкости в редукционной камере, дополнительного падения давления в соединительной арматуре не происходит;
- при повышении редуцированного давления P_{RED} происходит постепенное поднятие золотника, который перекрывает перепускное окно, при этом при некотором минимальном значении входного давления $P_{IN\ MIN}$ давление в редукционной камере стабилизируется и становится равным P_{RED} ;
- динамика движения золотника определяется жёсткостью пружины k , для имитации реалистичного движения золотника дополнительно введён коэффициент демпфирования b ;
- зазор между золотником и корпусом пренебрежимо мал, истечение жидкости через зазор отсутствует;
- размеры золотника приняты следующими: длина золотника принята равной $4a$, высота головки золотника равна размеру перепускного окна, диаметр золотника D_s подбирается в процессе решения задачи;

Определение текущего значения редуцированного давления производится из соображений равенства расхода через перепускное окно и через нерегулируемый дроссель. Перепускное окно можно условно представить в виде диафрагмы переменной площади истечения, а нерегулируемый дроссель - в виде диафрагмы постоянного диаметра:

$$Q_{o1} = Q_{o2} \rightarrow C_d A_{o1} \sqrt{\frac{2\Delta P_1}{\rho(1-\beta_{o1}^4)}} = C_d A_{o2} \sqrt{\frac{2\Delta P_2}{\rho(1-\beta_{o2}^4)}},$$

где индекс o1 соответствует перепускному окну, o2 – нерегулируемому дросселю; ρ – плотность жидкости (кг/м³); β – отношение диаметра диафрагмы к диаметру трубы (в случае перепускного окна рассчитывается эквивалентный диаметр для круглого сечения равной площади), $\Delta P_1 = P_{IN} - P_{RED}$ (Па), $\Delta P_2 = P_{RED} - P_{OUT}$ (Па); C_d – коэффициент истечения; A – площадь диафрагмы, для нерегулируемого дросселя является постоянной величиной, для перепускного окна определяется как $A_{o1} = l(a - x_1)$ (м²), где l – длина перепускного окна по окружности головки золотника - $l = \frac{D_S}{2}\alpha$ (м), $\alpha = 2 \sin^{-1} \frac{a}{D_S}$ (рад) – угловой размер перепускного окна.



Тогда:

$$P_{RED} = \frac{\gamma_1 P_{IN} + \gamma_2 P_{OUT}}{\gamma_1 + \gamma_2}, \text{ где } \gamma_1 = A_{o1}^2 (1 - \beta_{o2}^4), \gamma_2 = A_{o2}^2 (1 - \beta_{o1}^4),$$

Сила, эквивалентная давлению в редуциционной камере, на головку золотника:

$$F_{RED} = P_{RED} \frac{\pi D_S^2}{4}.$$

Тогда динамика золотника может быть описана следующим образом:

$$m_s \ddot{x} + b\dot{x} + kx + F_{INIT} + mg - F_{RED} = 0,$$

где m_s – масса золотника.

Предварительно были определены начальные значения искомых параметров геометрии золотника в соответствии с соотношениями для проектного расчёта простого редуциционного клапана при коэффициенте пропускной способности $K_v = 0.92$, при котором при падении давления на клапане в 10 атм расход будет равен $0.9 \cdot 10^{-3}$ м³/с. Тогда средняя скорость потока v_{MEAN} :

$$v_{MEAN} = \sqrt{\frac{2}{\rho} 0.02 \dots 0.05 P_{IN}} = 9.24 \text{ м/с},$$

где ρ – плотность жидкости, по заданию – керосин при температуре 20 °С = 819 кг/м³

Тогда площадь клапана A_{o1} :

$$A_{o1} = \frac{Q}{v_{MEAN}} = 9.74 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

Тогда размер перепускного окна $a = 0.0099$ м.

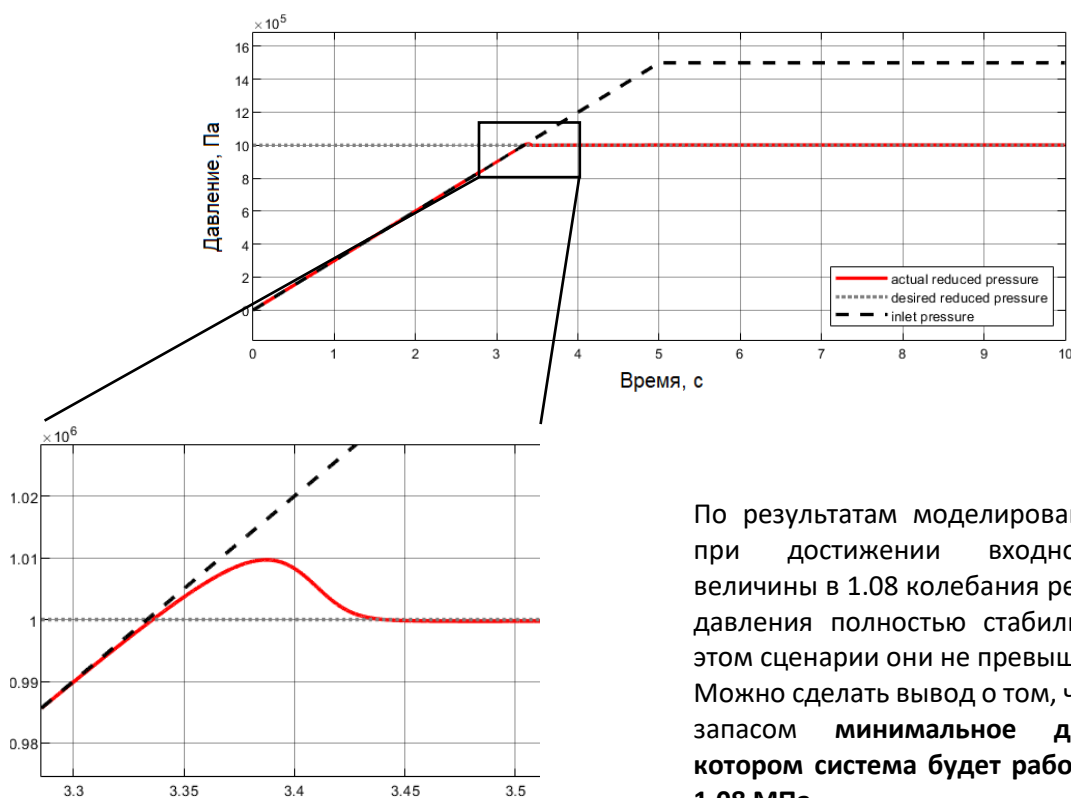
Предварительное нагружение золотника было выбрано из расчёта $F_{INIT} = c P_{DES} \frac{\pi D_S^2}{4}$, где коэффициент c принят равным 1, впоследствии при оптимизации подобран равным 0.98.

Коэффициент жёсткости k был выбран произвольно равным 1 кН/м, коэффициент демпфирования был включён в расчёт, чтобы исключить высокочастотные колебания золотника, которые в реальности не возникают в виду диссипации энергии на преодоление силы трения между золотником и корпусом, а также, вероятно, вязкостных сил, возникающих при движении золотника в работающем клапане.

Расчётные параметры были использованы при моделировании системы для их оптимизации с целью подбора такой комбинации искомых параметров, чтобы, начиная с некоторой величины входного давления $P_{IN\ MIN}$, давление в редукционной камере было постоянным и равным 10 атм. Задача оптимизации решалась с использованием Matlab, аргументами оптимизационной задачи выбраны диаметр головки золотника, размер перепускного окна и жёсткость пружины, а также коэффициент ς . Таким образом были **определены параметры, при которых в редукционной камере достигается постоянное давление в 10 бар:**

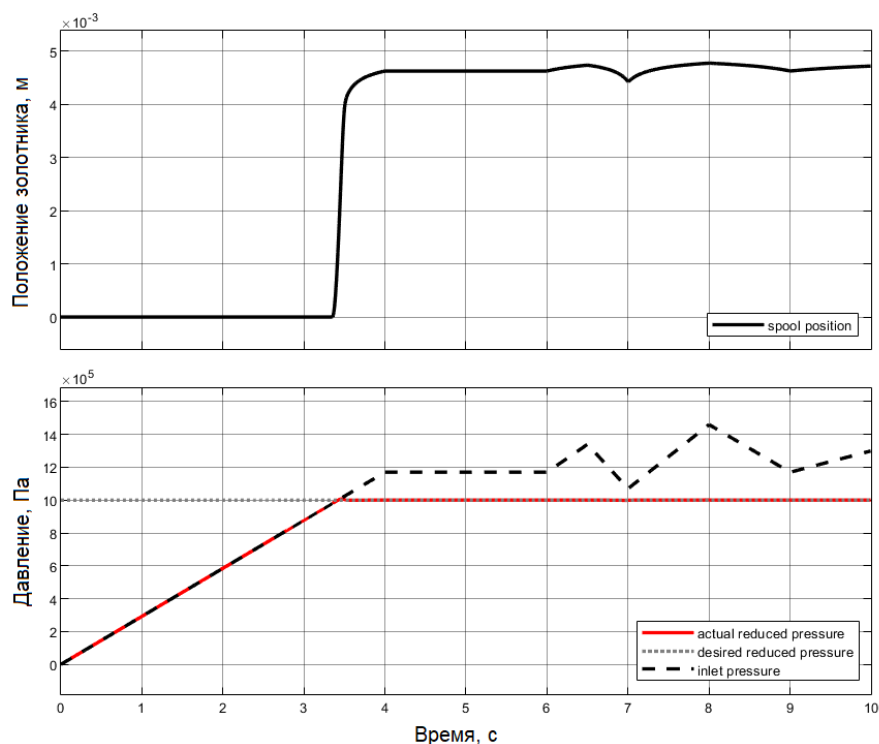
- диаметр золотника - 0.0257 м,
- размер перепускного окна - 0.005 м,
- жёсткость пружины – 2.23 кН/м.

Для проверки работы модели системы разработан сценарий изменения входного давления P_{IN} , который имитирует постепенное линейное увеличение избыточного давления от 0 до 1.5 МПа:

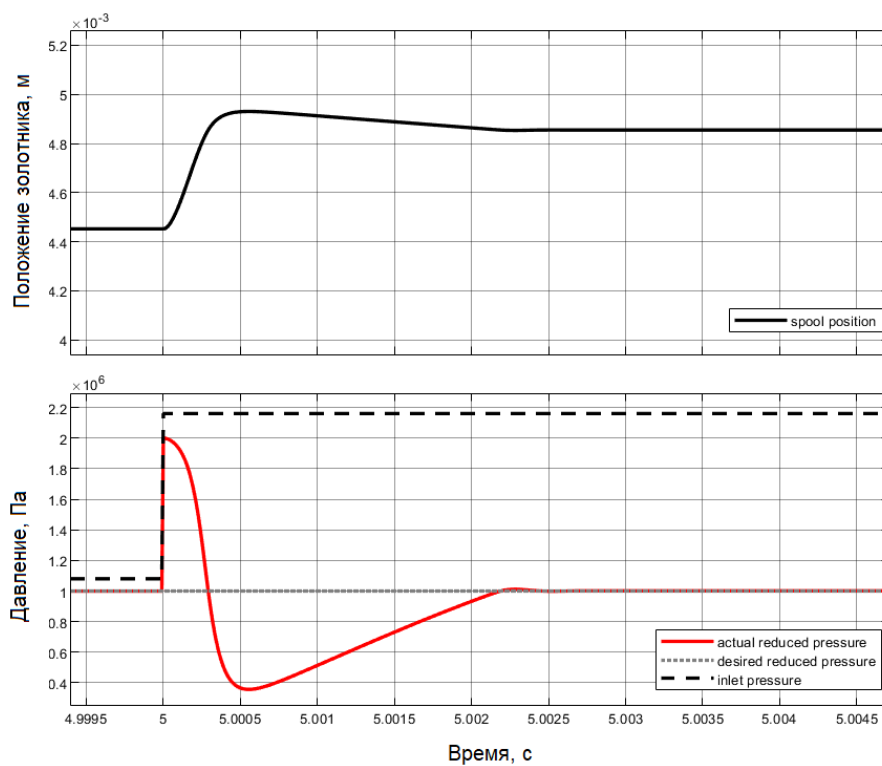


По результатам моделирования видно, что при достижении входного давления величины в 1.08 колебания редуцированного давления полностью стабилизируются, при этом сценарии они не превышают 1% от P_{DES} . Можно сделать вывод о том, что с некоторым запасом **минимальное давление, при котором система будет работать - $P_{IN\ MIN}$ – 1.08 МПа**

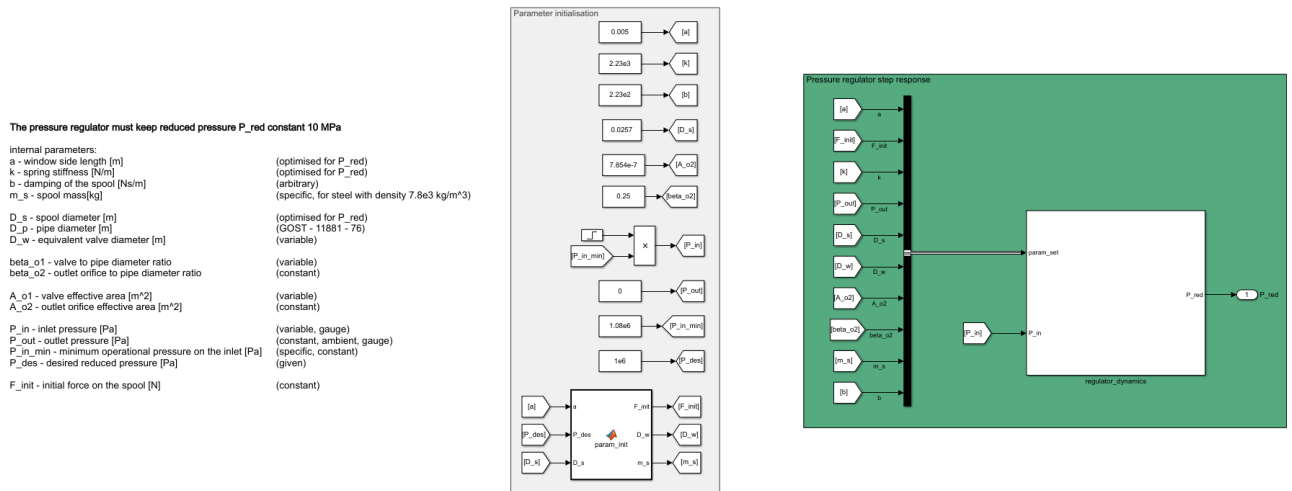
Система также ведёт себя устойчиво, редуцированное давление держится на требуемом уровне при колебаниях входного давления:



При номинальном режиме работы, когда $P_{IN} = P_{IN\ MIN}$ ступенчатое воздействие $P_{IN} = 2 P_{IN\ MIN}$ приводит к тому, что отклик системы имеет большую начальную амплитуду, что связано, вероятно, с низким коэффициентом демпфирования. Несмотря на это, редуцированное давление по истечению короткого переходного процесса стабилизируется:



Модель реализована в среде Simulink:

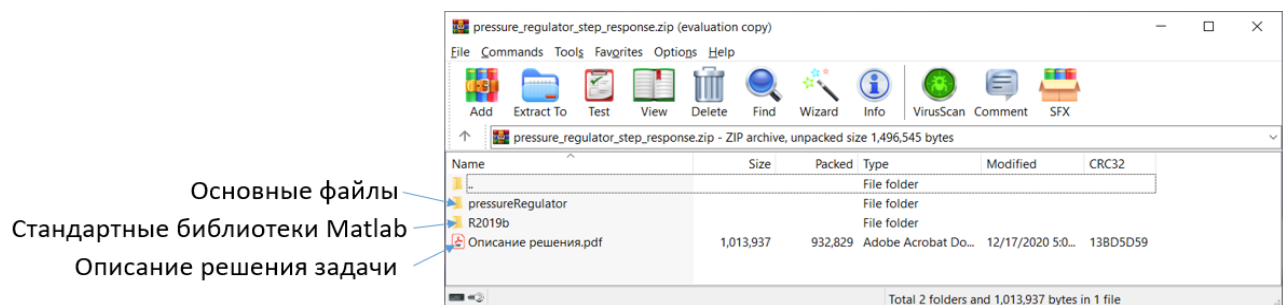


Её выходом является массив значений редуцированного давления – отклик системы на ступенчатое воздействие. Ступенчатое воздействие смоделировано следующим образом:

$$P_{IN} = \begin{cases} P_{IN\ MIN}, & t < 0.1\ c \\ 2 \cdot P_{IN\ MIN}, & t \geq 0.1\ c \end{cases}, \quad t \in [0, 0.5]\ c,$$

В начальный момент времени клапан полностью закрыт, что соответствует положению золотника $x_1 = a$, при этом в редуционной камере нулевое избыточное давление. Так как ступенчатое воздействие смоделировано не в начальный момент времени, золотник начинает опускаться, а редуцированное давление повышается до тех пор, пока система не придёт в равновесие, в котором золотник принимает некое устойчивое положение, а давление в редуционной камере равно требуемому.

Модель экспортирована в виде кода на С, при этом проект включает в себя необходимые файлы, непосредственно описывающие работу модели, а также ряд необходимых стандартных библиотек Matlab:



В папке pressureRegulator также содержится скомпилированный исполняемый файл pressure_regulator_step_response.exe, запуск которого приводит к генерации файла pressure_regulator_step_response.mat. Файл содержит в себе массив rt_reduced_pressure числовых значений в формате float, который является массивом значений редуцированного давления – отклик системы на смоделированное ступенчатое воздействие.