|  |  |
| --- | --- |
|  | **Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  **высшего образования**  **«Московский государственный технический университет**  **имени Н.Э. Баумана**  **(национальный исследовательский университет)»**  **(МГТУ им. Н.Э. Баумана)** |

ФАКУЛЬТЕТ «Энергомашиностроение»

КАФЕДРА «Поршневые двигатели»

**ОТЧЕТ ПО ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКЕ**

Студент Рахимгалиев Темирлан

*фамилия, имя, отчество*

Группа Э2-81Б

Тип практики преддипломная практика

Название предприятия МГТУ им. Н.Э. Баумана

Студент **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

*подпись, дата фамилия, и.о.*

Руководитель практики **\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

*подпись, дата фамилия, и.о.*

Оценка \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

*2021 г.*

**СОДЕРЖАНИЕ**

Введение 3

1 Исходные данные 4

2 Расчет пружины 5

2.1 Определение закона движения клапана 4

2.2 Определение приведенной к оси клапана силы инерции 7

2.3 Конструкция и расчет пружины 8

3 Оптимизация клапанной пружины по Паретто 11

3.1 Формулировка задачи оптимизации 11

3.2 Построение фронта Парето клапанных пружин 12

Заключение. 14

Список использованной литературы 15

Приложения 16

**ВВЕДЕНИЕ**

Исходя из темы преддипломной практики необходимо оптимизировать клапанную пружину использую двигателя 4ЧН9,11/9,9 с помощью программы написанной на языке программирования Python v3.8.

**1 Исходные данные**

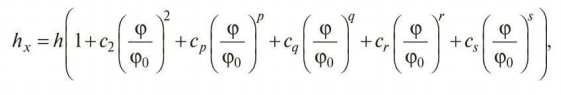
Таблица 1 – Технические характеристики двигателя [\*]

|  |  |
| --- | --- |
| Тип двигателя | С воспламенением от сжатия |
| Число тактов | 4 |
| Число цилиндров | 4 |
| Расположение цилиндров | рядное |
| Порядок работы цилиндров  Углы вспышек | 1-2-4-3  0-180-540-360 |
| Направление вращения коленчатого  вала (по ГОСТ 22836-77) | Правое |
| Диаметр цилиндров и ход поршня, мм | 91,1Х95 |
| Рабочий объем, л | 2,5 |
| Степень сжатия | 21 |
| Система наддува | турбокомпрессор MD187211 |

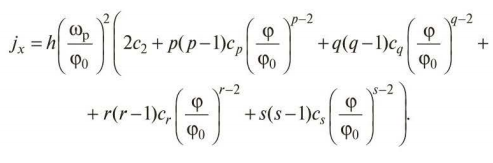
**2 Расчет пружины**

**2.1 Определение закона движения клапана**

Наибольшее распространение получил закон движения клапана на расчетном режиме работы двигателя, выраженный полиномом вида:



Ускорение клапана получают дифференцированием данного выражения:



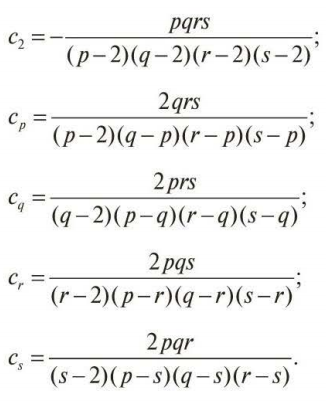
h – максимальная высота подъема клапана,

φ – угол поворота кулачка отсчитываемый от его вершины,

φ0 – угол профиля от начала подъема кулачка до его вершины, (φ0 = 84°)

p, q, r, и s – возрастающие целые числа (p ≥ 4), подчиняющий арифметической прогрессии с разностью p – 2.

Постоянные коэффициенты c2, cp,cq,cr, cs определяются по следующим формулам:



Коэффициент p принмается равным 4 тогда p – 2 = 2:

p = 4, q = 6, r = 8, s = 10

c2 = -5, cp = 10, cq = -10, cp = 5, cs = -1.

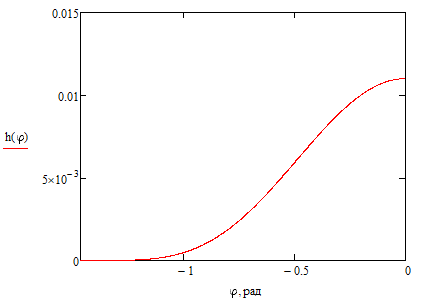


Рисунок 2.1.1 – График движения клапана в зависимости от угла поворота кулачка

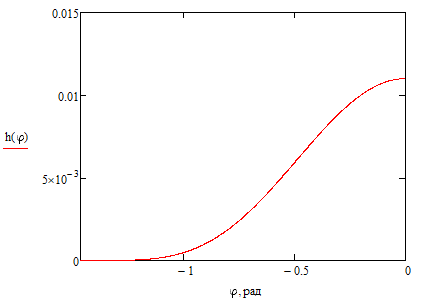


Рисунок 2.1.2 – График ускорения клапана в зависимости от угла поворота кулачка

Максимальное ускорение достигается при угле поворота кулачка:

φ= 42°,

значение ускорения при φ= 42°:

jmax = 1330 м / c2

**2.2 Определение приведенной к оси клапана силы инерции**

Максимальная приведенная к оси клапана сила инерции

Pjx = - mсум.к \* jmax

mсум.к – приведенная масса (суммарная масса клапана, гидрокомпенсатора, кулачка и пружины)

mсум.к = 0,115 кг,

тогда

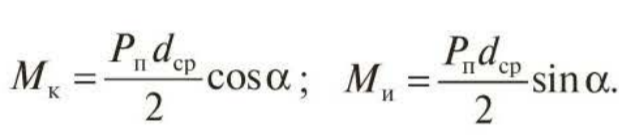
Pjx = -152.6 Н.

**2.3 Конструкция и расчет пружины**

В поршневых двигателях применяются пружины из круглой проволоки. Круглое сечение хорошо работает на кручение, которому подвергаются витки при сжатии пружины. К основным параметрам цилиндрической пружины относятся диаметр проволоки δ, индекс пружины  (dср - средний диаметр), шаг витков, число ее рабочих витков iп = Lп / t (где Lп – длина рабочей части пружины).

Принимается с = 4, δ = 0,006 м, тогда dср = 0,024 м.

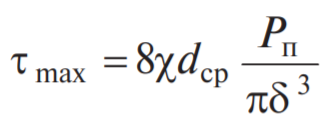
Изменяя индекс и сохраняя жесткость пружины, можно изменять ее длину и диаметр. Силовые факторы. в поперечных сечениях клапанной пружины сводятся к моменту Мк = Рп\*dср/2 и силе, действующей вдоль оси пружины. Момент М раскладывают на крутящий и изгибающий моменты:



Обычно угол подъема витков α = 10 ... 12° и расчет пружины можно вести только на кручение от момента Mk= Рп\*dср/2:

Мк = 2,93 Н \* м.

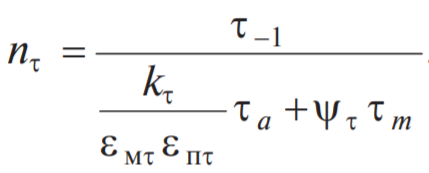
Наибольшее напряжение кручения возникает на внутренних во окнах:



где χ = 1 + 1,45/с = 1.363 - коэффициент, учитывающий кривизну витков. При расчете пружин искомым является диаметр δ проволоки. Задаваясь в соответствии с выбранной маркой стали допускаемыми напряжениями [τ], определяют δ. Полученное значение δ округляют в большую сторону до ближайшего стандартного диаметра проволоки и повторяют расчет пружины.

τmax = 94,12 МПа.

Значение коэффициента запаса n определяют по формуле:



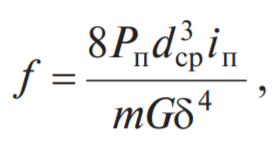
nτ = 3,582

где kτ - эффективный коэффициент концентрации напряжений,

eмτ – коэффициент влияния абсолютных размеров,

eпτ - коэффициент влияния состояния поверхностного слоя,

Осевое упругое сжатие пружины



f = 1,562 мм.

где m - коэффициент, который учитывает влияние перерезывающих сил, зависящих от с и который с достаточной точностью может быть принят равным 0,95-1,00; G - модуль сдвига.

По результатам расчета строят характеристику пружины (рисунок 2.2.1) и устанавливают значение усилия пружины по при закрытом клапане:

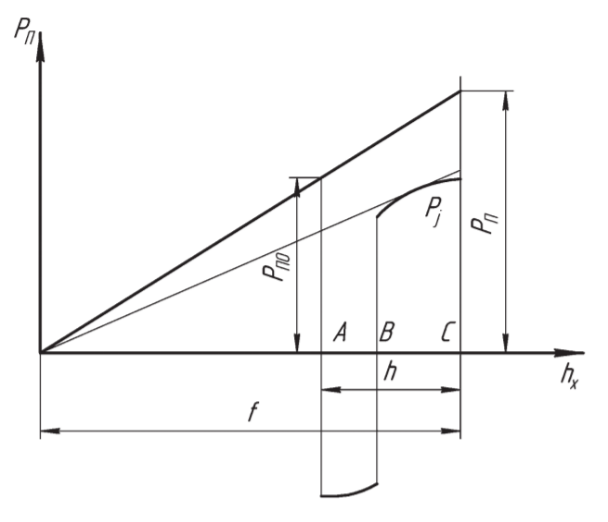
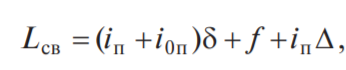


Рисунок 2.2.1 – Изменение силы пружины (J) и сил инерции (2) по подъему клапана

Сила пружины выпускного клапана Рп должна быть достаточной для удержания клапана в закрытом состоянии во время такта впуска с учетом разрежения Δр в цилиндре.

Длина пружины в свободном состоянии



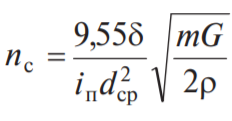
где п = 2-3 - число опорных витков; Δ = 0,2 ... 0,3 мм - величина зазора между витками пружины при открытом клапане, зависящая от размеров пружины.

Lсв = 51 мм.

Длина пружины в сжатом состоянии:

Lсж= Lсв - f = 49 мм

После определения размеров пружины ее проверяют на резонанс. При резонансе перемещение среднего витка пружины резко возрастает. Обычно определяют число пс собственных колебаний пружины в минуту и отношение пс к частоте вращения пр распределительного вала. Число собственных колебаний пружины



где G - модуль упругости II рода материала пружины; ρ - плотность материала пружины.

nc = 37550

Опасность резонанса считается незначительной, если отношение nc / np > 8; значение nc не должно быть кратным np.

**3 Оптимизация клапанной пружины по Паретто**

Для оптимизации клапанной пружины написана программа на языке программирования Python v3.8.

**3.1 Формулировка задачи оптимизации**

В качестве исходных данных программа будет принимать

- P­p – сила, необходимая для удержания клапана в открытом состоянии

- h – ход кулачка

- f – максимальное сжатие пружины

Кроме того, нужно определить константы, описывающие материал из которого будет изготовлена пружина.

Выше перечисленные данные записываются в файл config.py (см. Приложение).

В файле data.py (см. Приложение) хранится массив из возможных геометрических параметров клапанных пружин.

Целевыми функциями будут являться коэффициент запаса, а также длина пружины в сжатом состоянии.

Искомыми параметры в этой задаче будут:

* + - средний диаметр пружины dcp
    - диаметр проволоки δ

**3.2 Построение фронта Парето клапанных пружин**

Как было сказано в предыдущей главе, целевыми функциями будут являться коэффициент запаса, а также длина пружины в сжатом состоянии.

Определим термин доминирования по Парето одной пружины над другой.

Критерии доминирования:

1. Больший коэффициент запаса.
2. Меньшая длина в сжатом состоянии.

Тогда пружина А доминирует по Парето Б, если А не хуже Б по данным двум критериям и хотя бы по одному из них превосходит Б.

Следовательно, в данной задаче нужно минимизировать функцию Lсжат и максимизировать nτ.

Так как критериев доминирования два, то фронт Парето будет выглядеть как ломанная линия в двумерном пространстве решений.

Пример исполнения программы (красным обозначен фронт) представлен на рисунках 3.1 – 3.3

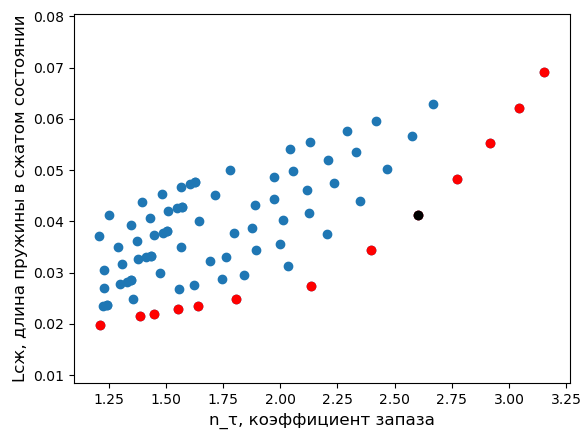


Рисунок 3.1 – зависимость длины пружины в сжатом состоянии от коэффициента запаса

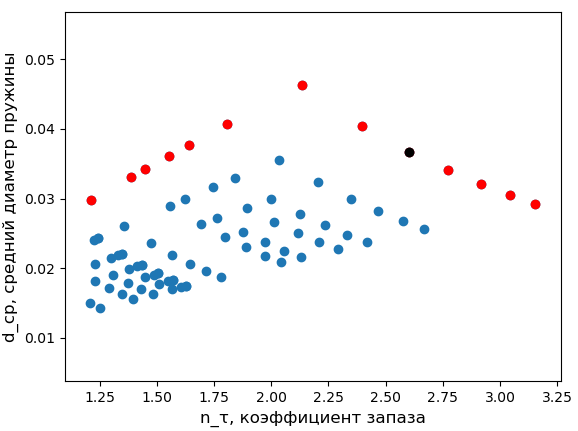


Рисунок 3.2 – зависимость среднего диаметра пружины от коэффициента запаса

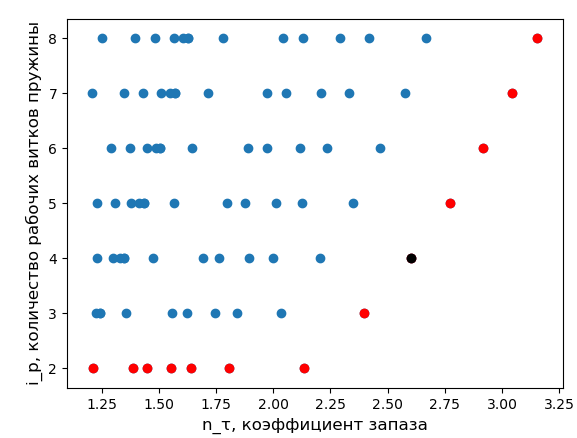


Рисунок 3.3 – зависимость количества рабочих витков пружины от коэффициента запаса

Из конструкционных соображений выбирается пружина c коэффициентом запаса 2,6 и длиной в сжатом состоянии 41 мм.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В таблице 2.4.1 представлены сравнения геометрических параметров, а также коэффициента запаса и длины пружины в сжатом сотоянии пружины расчитаной по классическому алгоритму и пружины оптимизированной по Паретто:

Таблица 2.4.1 – Результаты сравнения пружин

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Пружина, расчитанная по классическому алгоритму | Пружина, оптимизированная по Паретто. |
| Средний диаметр, мм | 24 | 36,7 |
| Диаметр проволоки, мм | 6 | 6,7 |
| Длина в сжатом состоянии, мм | 49 | 41,3 |
| Коэффициент запаса | 3,6 | 2,6 |

Вывод: пружина, оптимизированная по Паретто имеет меньшую длину сжатия, но также и меньший коэффициент запаса. Коэффициент запаса является допустимым для обеих пружин является допустимым. Пружина, оптимизированная по Паретто позволяет уменьшить габариты ГБЦ, следовательно, уменьшить конструкцию двигателя.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

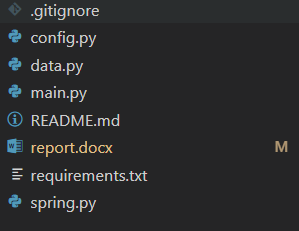
1. Двигатели внутреннего сгорания. Ч. 1. Теория поршневых и комбинированных двигателей. / под редакцией А. С. Орлина, М. Г. Круглова. Москва: Изд-во Машиностр., 1983. 372 с
2. С. Люк: Основы метаэвристики, 2009. 204 c.
3. Кинжало О.С. Дизели и газовые двигатели. Отраслевой каталог. Москва: Изд- во М. ун-та, 1991. 193 с.
4. Генкин К.И. Газовые двигатели. Москва: Изд- во Машиностр., 1977. 196 с.
5. Барченко Ф.Б. Лекции по теории поршневых и комбинированных двигателей. Москва, 2020.

**Приложение А**

**Программа оптимизации пружины в Python**

**Приложения**

1. Структура проекта:



1. main.py
2. # -\*- coding: utf-8 -\*-
3. import math
4. import random
5. import matplotlib.pyplot as plt
6. from config import Config
7. from spring import Spring
8. from data import array\_of\_delta\_sp, array\_of\_i\_p\_sp
9. def print\_smt(value, description="DATA"):
10. print()
11. print("------------------------" + description + "------------------------")
12. print(value)
13. print("------------------------" + description + "------------------------")
14. print()
15. def show\_plot(all\_springs, front):
16. plt.xlabel("n\_tau", fontsize=15)
17. plt.ylabel("L\_szhat", fontsize=15)
18. all\_springs\_x = [i.n\_tau for i in all\_springs]
19. all\_springs\_y = [j.L\_szhat for j in all\_springs]
20. plt.scatter(all\_springs\_x, all\_springs\_y)
21. front\_springs\_x = [i.n\_tau for i in front]
22. front\_springs\_y = [j.L\_szhat for j in front]
23. plt.scatter(front\_springs\_x, front\_springs\_y, c="r")
24. plt.show()
25. if \_\_name\_\_ == "\_\_main\_\_":
26. # Main program starts here
27. pop\_size = 20
28. # max\_gen = 921
29. max\_gen = 921
30. # Initialization
31. min\_x = -55
32. max\_x = 55
33. solution = [min\_x + (max\_x - min\_x) \* random.random() for i in range(0, pop\_size)]
34. gen\_no = 0
35. config = Config()
36. springs = []
37. for delta\_sp in array\_of\_delta\_sp:
38. for i\_p\_sp in array\_of\_i\_p\_sp:
39. spring = Spring(config, delta\_sp, i\_p\_sp)
40. if spring.is\_spring\_ok():
41. springs.append(spring)
42. front = []
43. if len(springs) == 0:
44. print("SPRING DO NOT FIT LIMITS")
45. exit(0)
46. # generate Pareto-front
47. for spring in springs:
48. not\_dominating = True
49. for front\_elem in front:
50. if spring.dominates\_by\_pareto(front\_elem):
51. print(front.index(front\_elem))
52. print(len(front))
53. front = [x for x in front if not x.equals(front\_elem)]
54. print(len(front))
55. if front\_elem.dominates\_by\_pareto(spring):
56. not\_dominating = False
57. if not\_dominating and not spring.on\_array(front):
58. front.append(spring)
59. for spring in front:
60. print(spring)
61. print("ALL SPRINGS ARR LEN: ", len(springs))
62. print("FRONT SPRINGS ARR LEN: ", len(front))
63. show\_plot(springs, front)
64. print(front[0])
65. print(springs[0])
66. spring.py
67. import math
68. import random
69. class Spring:
70. def \_\_init\_\_(self, config, delta\_sp, i\_p\_sp):
71. self.config = config
72. self.h\_sp = config.h\_sp
73. self.k\_sp = config.k\_sp
74. self.G\_sp = config.G\_sp
75. self.n\_p = config.n\_p
76. self.m\_sp = config.m\_sp
77. self.ro\_sp = config.ro\_sp
78. self.gap\_sp = config.gap\_sp
79. self.i\_0p\_sp = config.i\_0p\_sp
80. self.P\_p = config.P\_p
81. self.f\_sp = self.P\_p / self.k\_sp
82. self.P\_p0 = self.P\_p \* (self.f\_sp - self.h\_sp) / self.f\_sp
83. self.delta\_sp = delta\_sp
84. self.i\_p\_sp = i\_p\_sp
85. self.d\_sr\_sp = self.\_get\_d\_sr\_sp()
86. # c - индекс пружины
87. self.c\_sp = self.d\_sr\_sp / self.delta\_sp
88. #
89. self.n\_c\_sp = self.\_get\_n\_c\_sp()
90. # высота пружины в свободном состоянии
91. self.L\_sv\_sp = self.\_get\_L\_sv\_sp()
92. # Высота пружины в сжатом состоянии
93. self.L\_szhat = self.L\_sv\_sp - self.f\_sp
94. # Наибольшее напряжение кручения
95. self.t\_max = self.\_get\_t\_max()
96. # Коэффициент запаса
97. self.n\_tau = self.\_get\_n\_tau()
98. # Возвращает число рабочих витков пружины (8.55)
99. def \_get\_d\_sr\_sp(self):
100. return (
101. self.f\_sp
102. \* self.m\_sp
103. \* self.G\_sp
104. \* self.delta\_sp \*\* 4
105. / (8 \* self.P\_p \* self.i\_p\_sp)
106. ) \*\* (1 / 3)
107. # Возвращает число собственных колебаний пружины (8.59)
108. def \_get\_n\_c\_sp(self):
109. return (
110. 9.55
111. \* self.delta\_sp
112. / (self.i\_p\_sp \* self.d\_sr\_sp \*\* 2)
113. \* (self.m\_sp \* self.G\_sp / (2 \* self.ro\_sp)) \*\* (1 / 2)
114. )
115. # Высота (длина) пружины в свободном состоянии (стр 333)
116. def \_get\_L\_sv\_sp(self):
117. return (
118. (self.i\_p\_sp + self.i\_0p\_sp) \* self.delta\_sp
119. + self.f\_sp
120. + self.i\_p\_sp \* self.gap\_sp
121. )
122. # t\_max - Наибольшее напряжение кручения
123. def \_get\_t\_max(self):
124. hi = 1 + 1.45 / self.c\_sp
125. return 8 \* hi \* self.d\_sr\_sp \* self.P\_p / (math.pi \* self.delta\_sp \*\* 3)
126. # n\_tau - коэффициент запаса
127. def \_get\_n\_tau(self):
128. k\_tau\_sp = self.config.k\_tau\_sp
129. e\_p\_tau\_sp = self.config.e\_p\_tau\_sp
130. \_lambda = 0.02e-3
131. e\_m\_tau\_sp = 0.5 + (1 - 0.5) \* math.exp(-\_lambda \* self.delta\_sp)
132. return self.config.t\_1\_sp / (k\_tau\_sp / e\_m\_tau\_sp / e\_p\_tau\_sp \* self.t\_max)
133. def is\_spring\_ok(self):
134. if self.\_is\_resonance\_possible() or self.n\_tau < 1.2:
135. return False
136. return True
137. # Возвращает true, если возможен резонанс (8.59)
138. def \_is\_resonance\_possible(self):
139. if (
140. self.n\_c\_sp / self.n\_p == int(self.n\_c\_sp / self.n\_p)
141. or self.n\_c\_sp / self.n\_p < 8
142. ):
143. return True
144. return False
145. def dominates\_by\_pareto(self, other):
146. if self.L\_szhat < other.L\_szhat and self.n\_tau > other.n\_tau:
147. return True
148. return False
149. def equals(self, other):
150. if (
151. self.d\_sr\_sp == other.d\_sr\_sp
152. and self.delta\_sp == other.delta\_sp
153. and self.i\_p\_sp == other.i\_p\_sp
154. ):
155. return True
156. return False
157. def on\_array(self, springs):
158. for s in springs:
159. if self.equals(s):
160. return True
161. return False
162. def \_\_str\_\_(self):
163. return (
164. "Spring:\n\tP\_p0 = {P\_p0} H\n\tP\_p = {P\_p} H\n\tk\_sp = {k\_sp} H/m\n\t"
165. "G\_sp = {G\_sp} Pa\n\tn\_p = {n\_p} rpm\n\td\_sr = {d\_sr\_sp} mm\n\ti\_p = {i\_p\_sp}"
166. "\n\tdelta = {delta\_sp} mm\n\tf\_sp = {f\_sp} mm\n\th\_sp = {h\_sp} mm\n\tro = {ro\_sp} kg/m^3"
167. "\n\tn\_c\_sp = {n\_c\_sp} rpm\n\tL\_szhat = {L\_szhat}\n\tn\_tau = {n\_tau} mm".format(
168. P\_p0=self.P\_p0,
169. P\_p=self.P\_p,
170. k\_sp=self.k\_sp,
171. G\_sp=self.G\_sp,
172. n\_p=self.n\_p \* 60,
173. d\_sr\_sp=self.d\_sr\_sp \* 1e3,
174. i\_p\_sp=self.i\_p\_sp,
175. delta\_sp=self.delta\_sp \* 1e3,
176. f\_sp=self.f\_sp \* 1e3,
177. h\_sp=self.h\_sp \* 1e3,
178. ro\_sp=self.ro\_sp,
179. n\_c\_sp=self.n\_c\_sp \* 60,
180. L\_szhat=self.L\_szhat \* 1e3,
181. n\_tau=self.n\_tau,
182. )
183. )
184. config.py
185. class Config:
186. def \_\_init\_\_(self):
187. # размер в СИ
188. # P\_p - значение усилия пружины при открытом клапане
189. self.P\_p = 400
190. # --------------------SPRING--------------------
191. # Максимальный подъем клапана по кулачку
192. self.h\_sp = 10E-3
193. # k\_sp - жесткость пружины
194. self.k\_sp = 30E3
195. # G\_sp - модуль сдвига
196. self.G\_sp = 80E9
197. # m\_sp - коэффициент, учитывающий влияние перерезывающих сил,зависящий от с,
198. # который с достаточной точностью может быть принят равным 0,95–1,00
199. self.m\_sp = 0.95
200. # n\_p - частота вращения коленвала
201. self.n\_p = 7300 /2 / 60
202. # ro\_sp - плотность материала пружины
203. self.ro\_sp = 7860
204. # gap\_sp - зазор между витками пружины при открытом клапане
205. self.gap\_sp = 0.2E-3
206. # i\_0p - число опорных витков
207. self.i\_0p\_sp = 2
208. # t\_0\_sp - Допускаемое статическое напряжение (тау), Па
209. self.t\_0\_sp = 600E6
210. # t\_0\_sp - Допускаемое динамическое напряжение (тау минус один), ПА
211. self.t\_1\_sp = 400E6
212. # эффективный коэффициент концентрации напряжений
213. self.k\_tau\_sp = 1.2
214. # Это оценивается коэффициентом влияния состояния поверхностного слоя
215. self.e\_p\_tau\_sp = 0.99
216. # --------------------END\_SPRING--------------------
217. data.py
218. array\_of\_delta\_sp\_inch = [
219. 0.363 / 2,
220. 0.256 / 2,
221. 0.355 / 2,
222. 0.344 / 2,
223. 0.284 / 2,
224. 0.414 / 2,
225. 0.332 / 2,
226. 0.360 / 2,
227. 0.382 / 2,
228. 0.312 / 2,
229. 0.532 / 2,
230. 0.442 / 2,
231. 0.483 / 2,
232. 0.424 / 2,
233. 0.456 / 2,
234. ]
235. array\_of\_delta\_sp = []
236. for delta\_sp in array\_of\_delta\_sp\_inch:
237. array\_of\_delta\_sp.append(delta\_sp \* 25.4 \* 10\*\*(-3))
238. # число опорных витков
239. array\_of\_i\_p\_sp = [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]