



МГТУ имени Н.Э. Баумана

Студенческая научная весна Аэрокосмический факультет



апрель 2023

«Математическое моделирование и оптимизация гидравлических систем синхронизации на основе стабилизаторов расхода»

Руководитель:

Бушуев А.Ю., доц. каф. ФН-11, канд. техн. наук

Автор(ы):

Резников А.О. студент группы АКЗ-41М.

Москва, 2023

Цель и задачи

Цель работы - построение полноценной модульной системы для математического моделирования и подбора оптимальных параметров системы синхронизации исполнительных органов(ССИО) на основе на основе стабилизаторов расхода(CP).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Численное моделирование работы стабилизатора расхода.
2. Решение динамической и статической задачи в условиях наличия и отсутствия реактивной силы.
3. Разработка программного комплекса с графическим интерфейсом для предварительного моделирования CP.
4. Разбиение всей системы на отдельные силовые цилиндры, и моделирование процессов в произвольном цилиндре.
5. Решение задачи анализа численным методом для каждого конкретного силового цилиндра на основе CP.
6. Решение задачи многомерной оптимизации использования такой алгоритм оптимизации как генетический алгоритм с бинарным кодированием.

Технический объект

- Синхронное раскрытие исполнительных органов обеспечивает минимальное расхождение в функционировании систем.

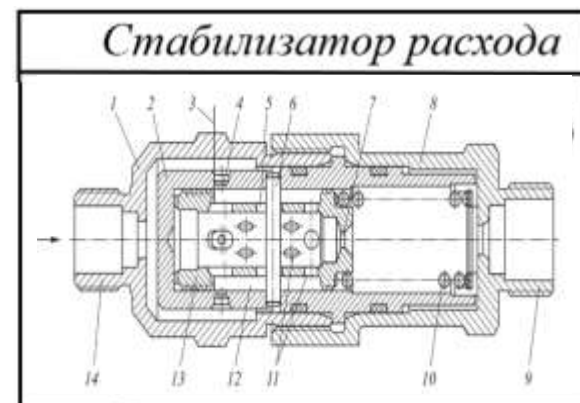
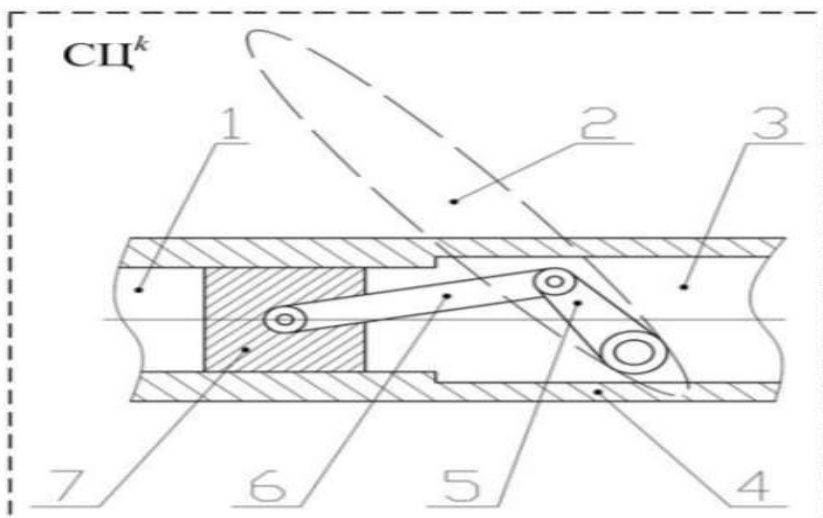
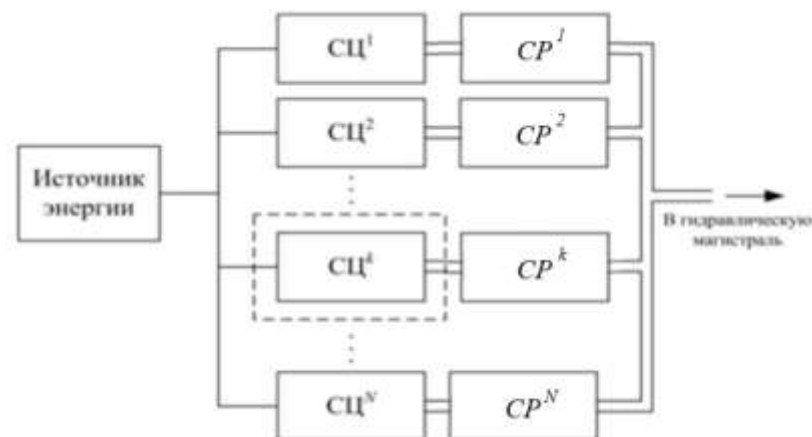


Структурная схема

Принципиальная схема пневмогидравлической системы представлена на рисунке:

изображена группа из N СЦ, $N \in \{N: N \geq 2, N < +\infty\}$

4 кривошипно-шатунными механизмами (КШМ), состоящими из кривошипа 5, шатуна 6 и плунжера 7. Все СЦ связаны между собой общей пневматической магистралью, по которой газы от источника энергии, например, баллона высокого давления или газогенератора на твёрдом топливе, поступают в газовую полость 1 соответствующего СЦ. Кривошип 5 конструктивно соединён с ИО 2.



Структура дроссельной системы синхронизации и облик -го k
 СЦ $k=1, \bar{N}$ на основе КШМ: 1 – газовая полость, 2 – ИО, 3 – жидкостная полость, 4 – корпус, 5 – кривошип, 6 – шатун, 7 – плунжер.

Стабилизатор расхода

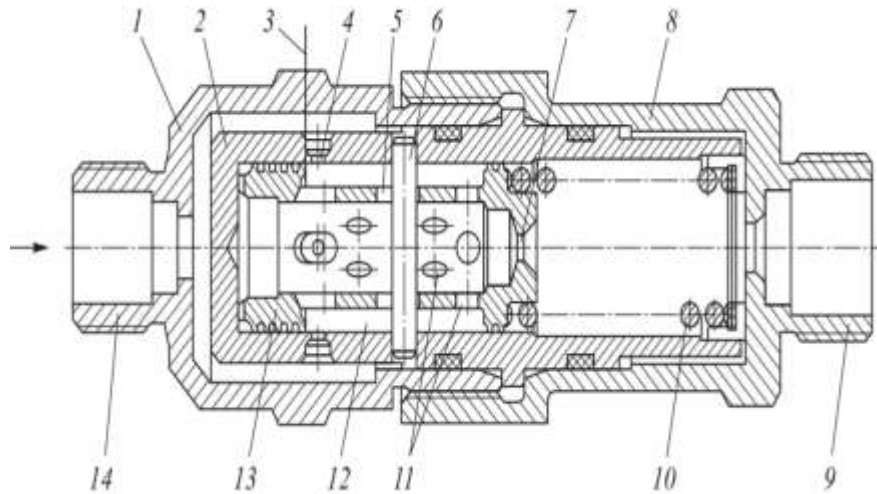


Рис. 1. Конструкция СР

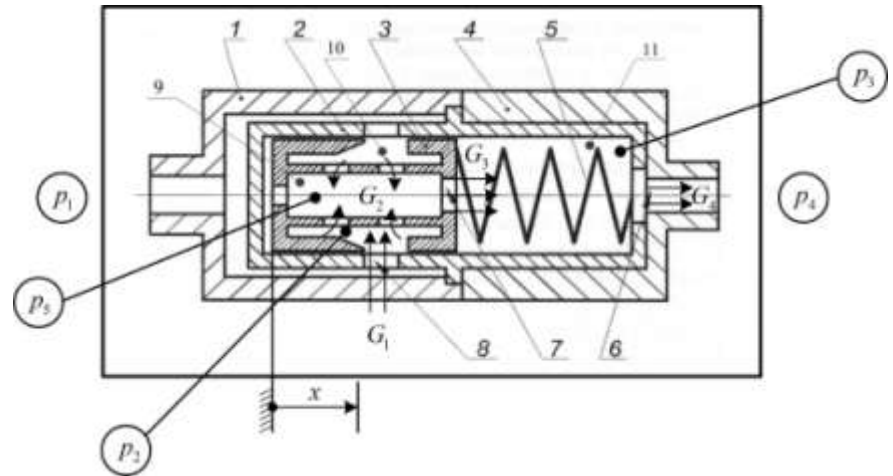


Рис. 2 Расчетная схема стабилизатора расхода

1 — разъемный корпус (деталь 1); 2 — гильза; 3 — острая кромка золотника; 4 — окна; 5 — пазы; 6 — стержень; 7 — калиброванный дроссель; 8 — разъемный корпус (деталь 2); 9 — штуцер выхода; 10 — пружина; 11 — отверстия круглого сечения; 12 — кольцевой канал; 13 — золотник; 14 — штуцер входа

Численное моделирование процессов в стабилизаторе расхода

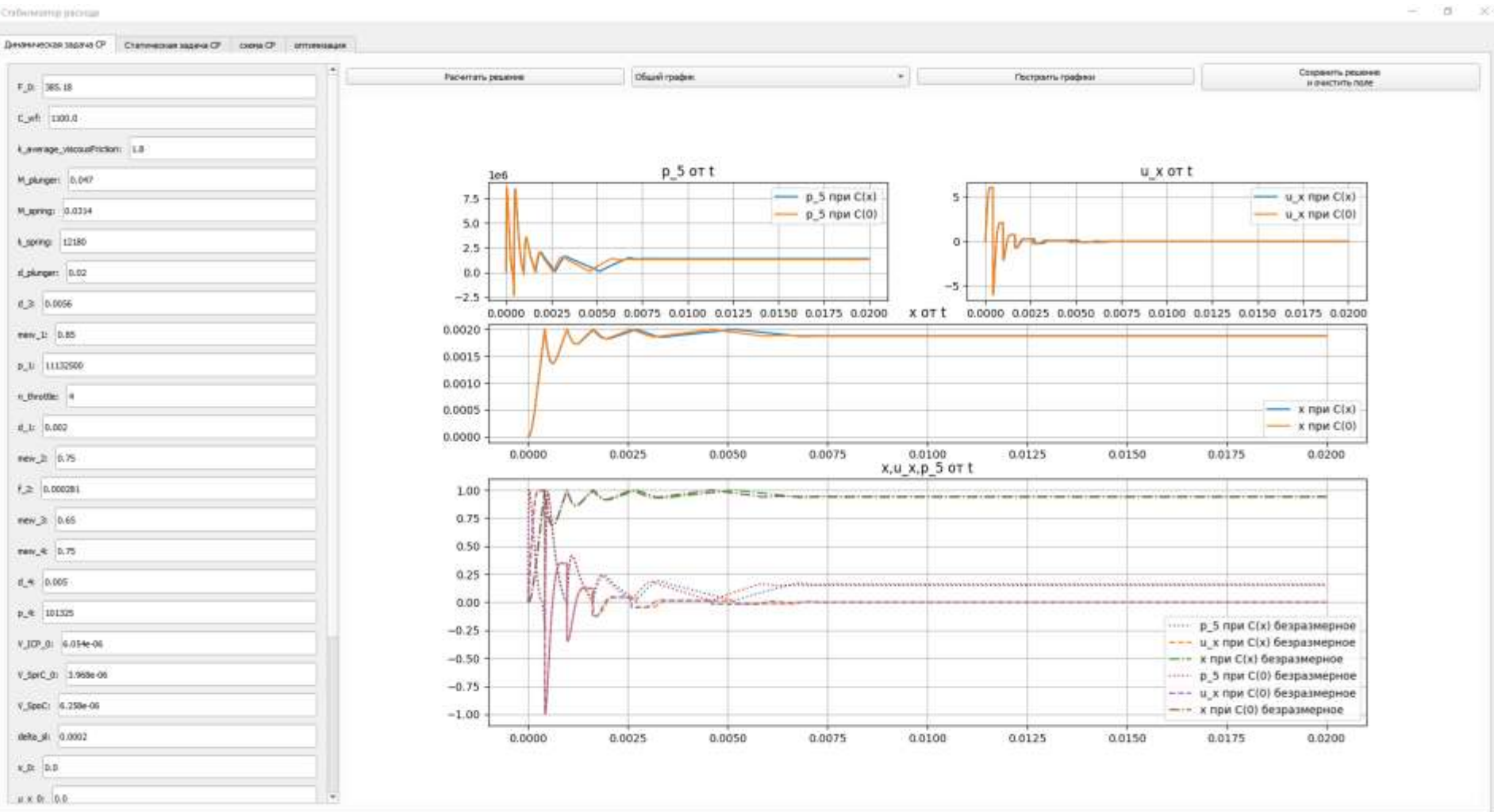
$$\begin{aligned} dx/dt &= v_x \\ dv_x/dt &= -2nv_x - k^2x + \frac{(p_5 - p_4)S_{\text{паб}} - F_0 + R_x}{M_{\text{ЭКВ}}} \\ dp_5/dt &= \frac{C_{\text{РЖ}}^2}{V_{\text{ВПП}}(t)} (-\rho_5 S_k v_x + G_1 + G_4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x(t_0) &= x_0 \\ v_x(t_0) &= v_{x0} \\ p_{out}(t_0) &= p_{out0} \end{aligned}$$

Где: $Y = Y(t) = \begin{pmatrix} x \\ v_x \\ p_5 \end{pmatrix}$. $n = \frac{k_{\text{втр}}^{cp}}{2M_{\text{ЭКВ}}}$ $M_{\text{ЭКВ}} = M_{nl} + \frac{1}{3}M_{np}$ $k = \sqrt{\frac{k_{np}}{M_{\text{ЭКВ}}}}$ $S_{\text{паб}} = \frac{\pi}{4}(d_{nl}^2 + d_3^2)$

Осевая составляющая реактивной силы: $R_x = C(x)n_{\partial p}S_{kp}(x)\Delta p_{12}$,

Интерфейс программного комплекса для моделирования и исследования поведения СР



Расчетная схема отдельного СЦ

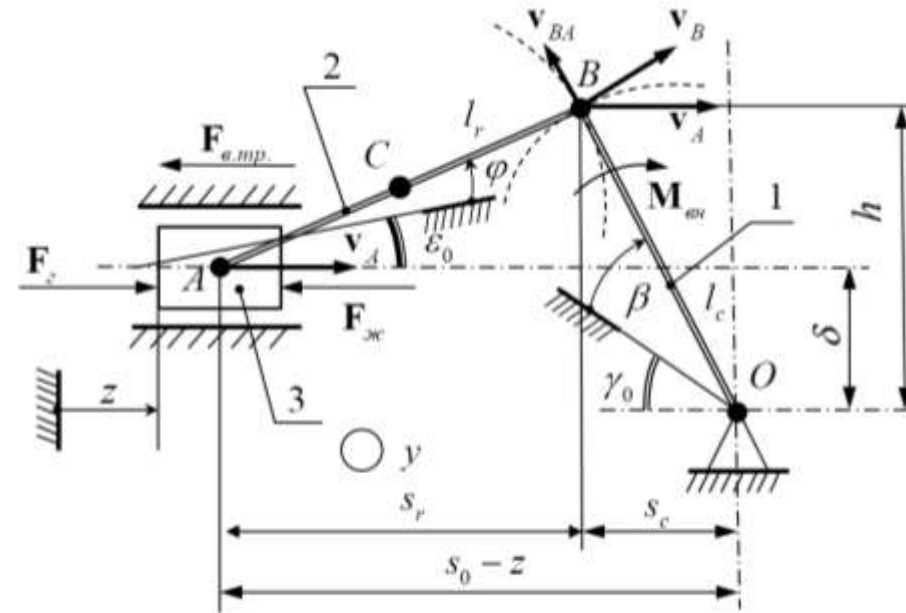
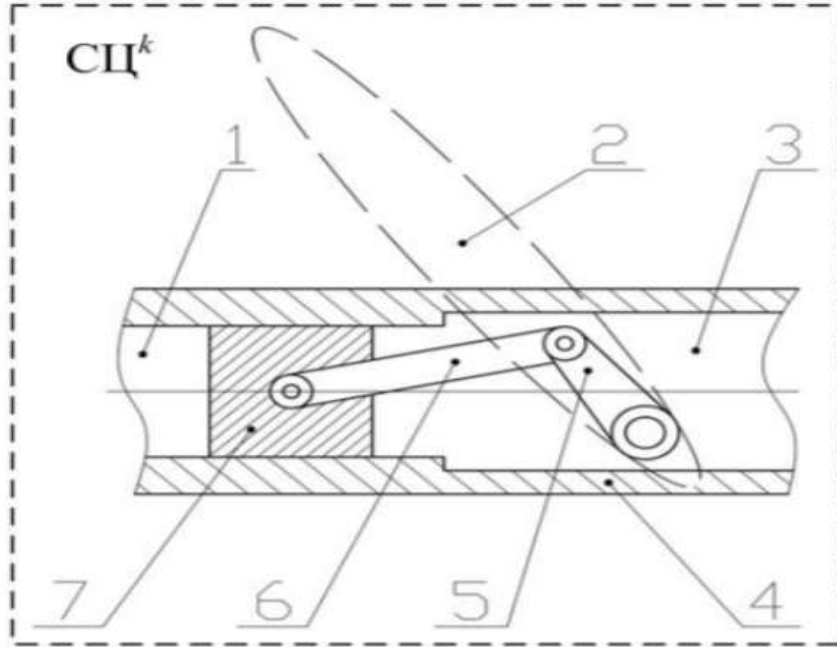


Рис. 1. Кривошипно-шатунный механизм СЦ при $\beta \in \left[0; \frac{\pi}{2} - \gamma_0\right]$.

Модель движения механизма перемещения ИО

$$d\omega^k / dt = d^2\beta^k / dt^2 = \left((p_{ES} - p_{liq}^k) S^k F_{1\pm}^k(\beta^k) - r_{vfric}^k (F_{1\pm}^k(\beta^k))^2 \omega^k - R_{\pm}^k(\beta^k) (\omega^k)^2 + M_{ext}^k \right) / J_{red}^k$$

Система уравнений ССИО

Нестационарная математическая модель дроссельной системы синхронизации, состоящей из N СЦ, с учётом допущения о нульмерности динамических процессов течения рабочей жидкости в соответствующих полостях пневмогидроагрегатов, детерминированности функции p_{ES} , определяющей давление в газовых полостях СЦ, и об отсутствии термодинамических процессов теплообмена с внешней средой, представлена системой восьми обыкновенных дифференциальных уравнений ($k=1,N$):

$$\begin{aligned}
 d\beta^k / dt &= \omega^k \\
 d\omega^k / dt &= d^2\beta^k / dt^2 = \left((p_{ES} - p_{liq}^k) S^k F_{1\pm}^k(\beta^k) - r_{vfric}^k (F_{1\pm}^k(\beta^k))^2 \omega^k - R_{\pm}^k(\beta^k) (\omega^k)^2 + M_{ext}^k \right) / J_{red}^k \\
 dp_{liq}^k / dt &= (a^2 / V_{liq}^k) \left(\rho_{liq}^k S^k F_{1\pm}^k(\beta^k) \omega^k + \operatorname{sgn}(p_{liq}^k - p_{out}) \mu^k f^k(2\rho_{liq}^k |p_{liq}^k - p_{out}|)^{0.5} \right) \\
 dx^k / dt &= v_x^k \\
 dv_x^k / dt &= -2nv_x^k - k^2 x^k + \frac{(p_5^k - p_4^k) S_{pa\hat{o}} - F_0 + R_x}{M_{\text{экв}}} \\
 dp_{out}^k / dt &= dp_5^k / dt = \frac{C_{PЖ}^2}{V_{ВПП}(t)} (-\rho_5^k S_k v_x^k + G_1 + G_4)
 \end{aligned}$$

– Для системы
синхронизации на основе СР

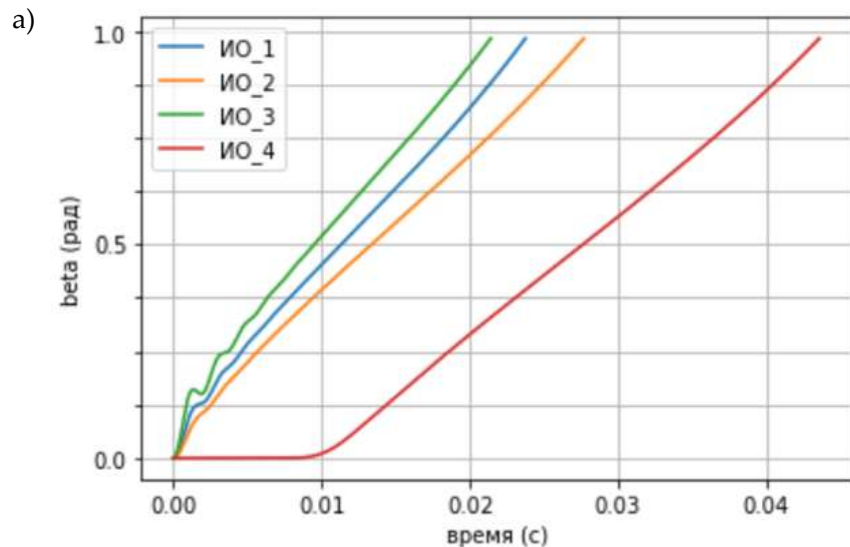
$$\begin{aligned}
 \beta^k(t_0) &= \beta_0^k \\
 \omega^k(t_0) &= \omega_0^k \\
 p_{liq}^k(t_0) &= (p_{liq}^k)_0 \\
 x^k(t_0) &= x_0^k \\
 v_x^k(t_0) &= v_{x0}^k \\
 p_{out}^k(t_0) &= p_{out0}^k
 \end{aligned}$$

Решение задачи анализа

$$p_{ES} = 100 \text{ (атм)}$$

$$M_{ext}^{(ИО_1)} = 100 \quad M_{ext}^{(ИО_3)} = 900 - t \cdot 4 \cdot 10^4$$

$$M_{ext}^{(ИО_2)} = -300 \quad M_{ext}^{(ИО_4)} = -900 + t \cdot 10^4$$



$$[P_1 \dots P_N] = [(\mu^1, d^1) \dots (\mu^N, d^N)] =$$

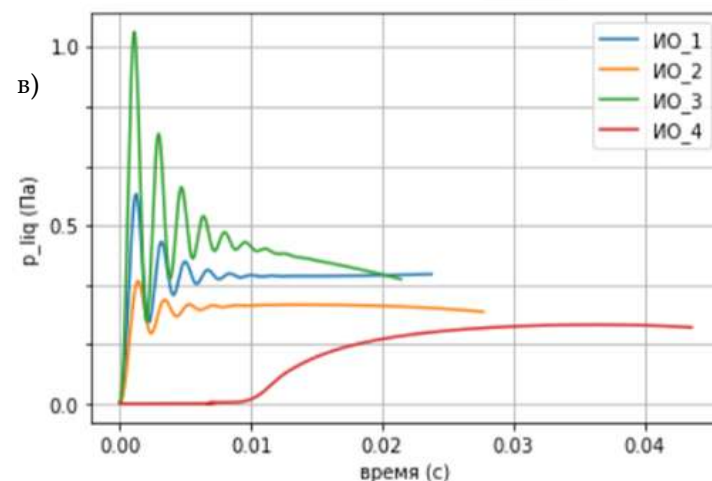
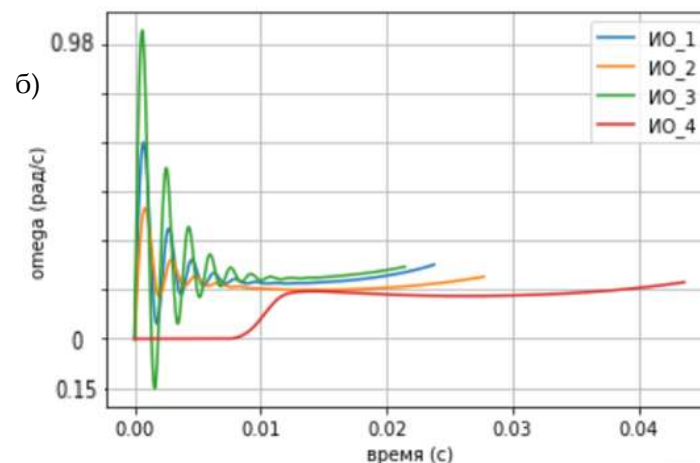
$$= [(0.75, 8 \cdot 10^{-5}), (0.75, 8 \cdot 10^{-5}), (0.75, 8 \cdot 10^{-5}), (0.75, 8 \cdot 10^{-5})]$$

$$N = 4$$

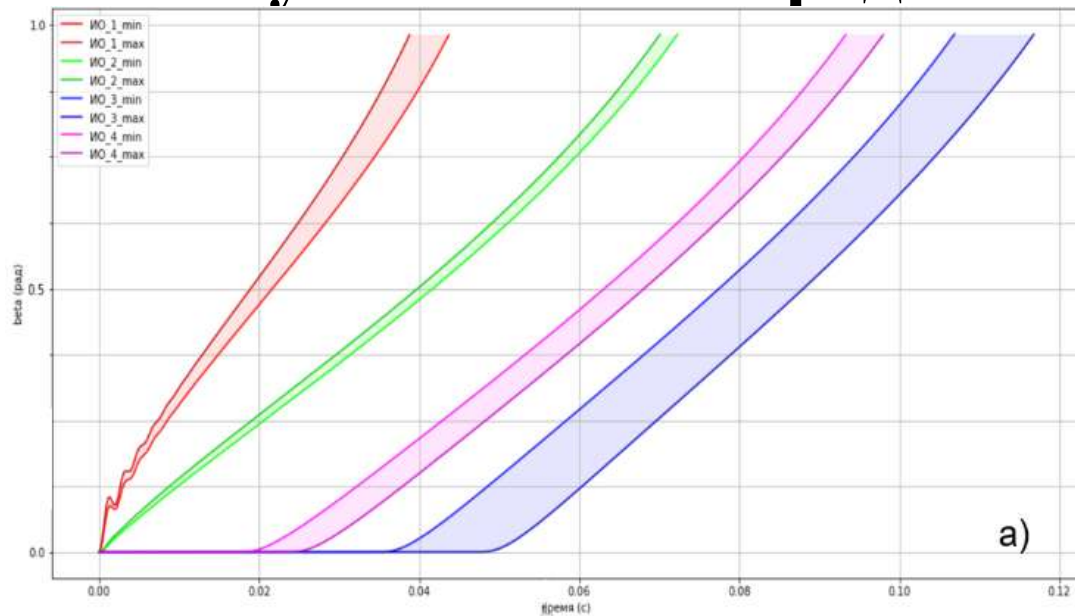
а) изменение угла раскрытия β^k от времени t для 4 ИО в условиях воздействия переменной внешней нагрузки

б) изменение угловой скорости всех ИО от времени t в условиях воздействия переменной внешней нагрузки

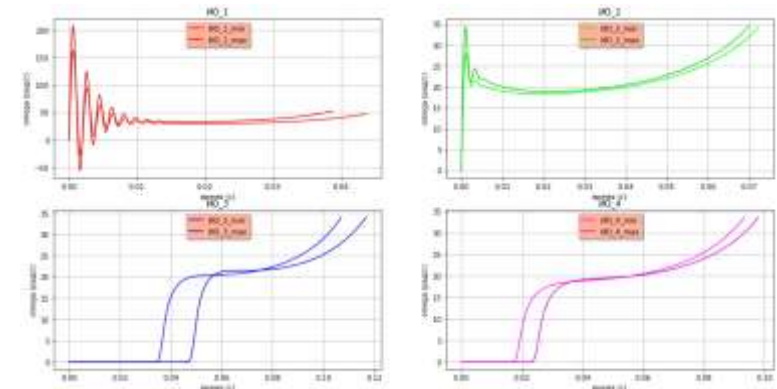
в) изменение давления в силовом цилиндре ИО от времени t в условиях воздействия переменной внешней нагрузки



Работа программы по решению задачи анализа в условиях неопределенных воздействий

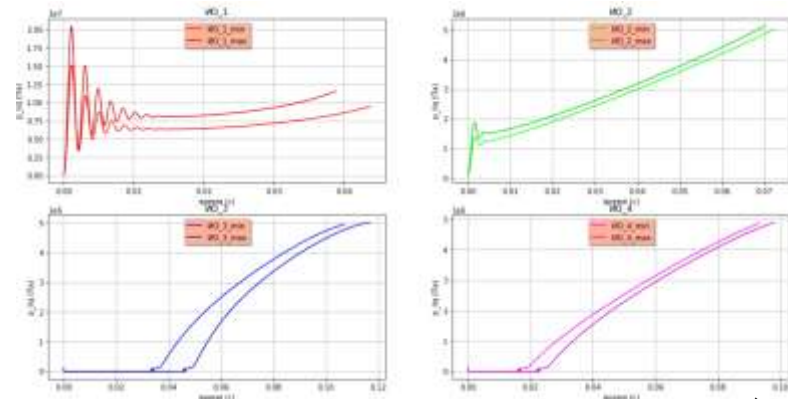


- а) фронт возможных изменений угла раскрытия от времени t для 4 ИО в условиях неопределенности внешних воздействий
 б) изменение угловой скорости всех ИО от времени t в условиях воздействия переменной внешней нагрузки
 в) изменение давления в силовом цилиндре ИО от времени t в условиях воздействия переменной внешней нагрузки



$$M_{\text{норм}} = [1000, 100, -200, -100]$$

б)



в) 16

Постановка задачи оптимизации

Рассмотрим целевую функцию $2N$ переменных $\Phi: Dr^1 \times Dr^2 \times \dots \times Dr^N \rightarrow \mathbb{R}_+$, для которой

$$\Phi_1(P_1, P_2, \dots, P_N) = \max \{t^1, t^2, \dots, t^N\} - \min \{t^1, t^2, \dots, t^N\} \rightarrow \min$$

$$Z_i = \frac{(\hat{\omega}_{\max} - \omega_{i,\max})}{\hat{\omega}_{\max}},$$

$$\Phi_{2,i}(P_1, P_2, \dots, P_N) = \exp(-Z_i)$$

$$\Phi_2(P_1, P_2, \dots, P_N) = \max (\Phi_{2,i}) \rightarrow \min_M \quad i = \overline{1, N}$$

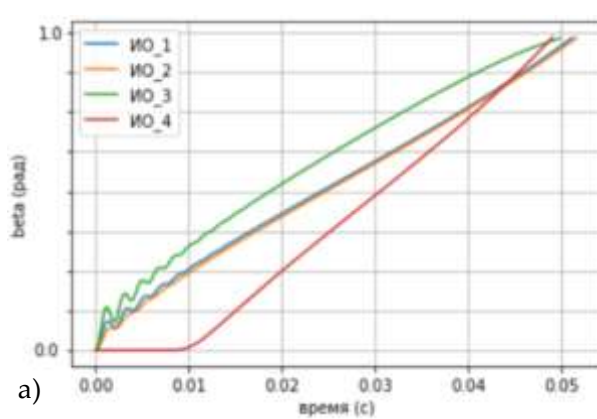
заданную на множестве $Dr^1 \times Dr^2 \times \dots \times Dr^N \subset \mathbb{R}^{2N}$ таким образом, что $P_k = (\mu^k, d^k) \in Dr^k \subset \mathbb{R}^2$, $k = \overline{1, N}$ где $Dr^k = [\mu_{\inf}^k; \mu_{\sup}^k] \times [d_{\inf}^k; d_{\sup}^k]$, $[\mu_{\inf}^k; \mu_{\sup}^k] \subset \mathbb{R}^1$, $\mu_{\inf}^k, \mu_{\sup}^k, d_{\inf}^k, d_{\sup}^k \in Dr^k = [\mu_{\inf}^k; \mu_{\sup}^k] \times [d_{\inf}^k; d_{\sup}^k] \{ \mathbb{R}: \mu_{\inf}^k, \mu_{\sup}^k, d_{\inf}^k, d_{\sup}^k > 0, \mu_{\inf}^k, \mu_{\sup}^k, d_{\inf}^k, d_{\sup}^k < +\infty \}$, $\mu_{\inf}^k, \mu_{\sup}^k, d_{\inf}^k, d_{\sup}^k$ — нижняя и верхняя границы диапазонов изменения коэффициента расхода и диаметра дросселирующего сечения k -ой шайбы, установленной в гидравлической линии k -ого СЦ, t^k — время движения k -ого ИО при изменении координаты кривошипа β^k КШМ в пределах от нуля до $\beta_{\max}$, определяемое двумерной точкой $P_k \in Dr^k$, $k = \overline{1, N}$ из решения прямой задачи.

Двухкритериальная оптимизации системы синхронизации ИО

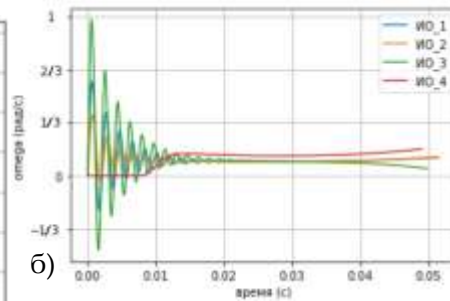
$$[P_1 \dots P_N] = [(\mu^1, d^1) \dots (\mu^N, d^N)] =$$

$$= [(0.75, 3.7 \cdot 10^{-5}), (0.75, 4.3 \cdot 10^{-5}), (0.75, 4.25 \cdot 10^{-5}), (0.75, 6.8 \cdot 10^{-5})]$$

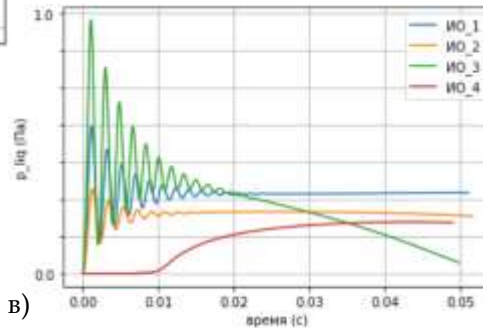
$$N = 4$$



а)



б)



в)

Для:

$$p_{ES} = 100 \text{ (атм)}$$

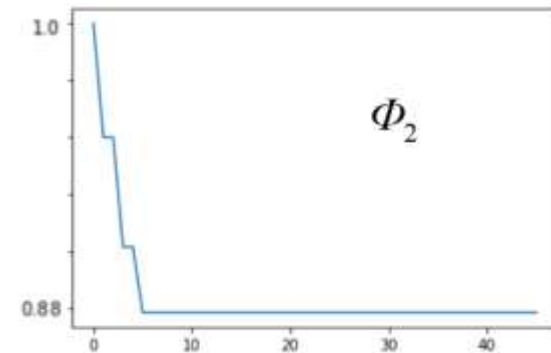
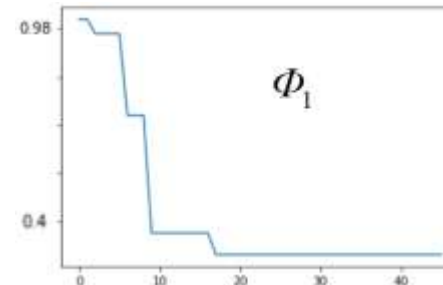
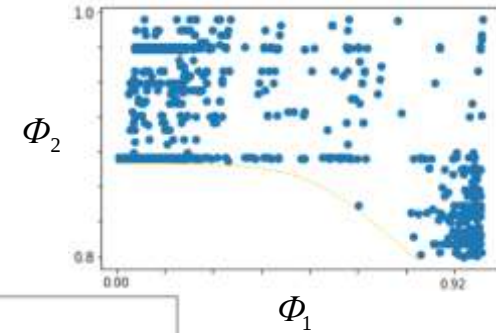
$$M_{ext}^{(ИО_1)} = 100 \quad M_{ext}^{(ИО_3)} = 900 - t \cdot 4 \cdot 10^4$$

$$M_{ext}^{(ИО_2)} = -300 \quad M_{ext}^{(ИО_1)} = -900 + t \cdot 10^4$$

а) изменение угла раскрытия β^k от времени t для 4 ИО в условиях воздействия переменной внешней нагрузки при оптимальных параметрах

б) изменение угловой скорости всех ИО от времени t в условиях воздействия переменной внешней нагрузки при оптимальных параметрах

в) изменение давления в силовом цилиндре ИО от времени t в условиях воздействия переменной внешней нагрузки при оптимальных параметрах



Выводы

Разработан программный комплекс для автоматизированного проектирования системы синхронизации исполнительных органов летательных аппаратов на основе стабилизаторов расхода.

Предложен новый двухкритериальный подход повышающий эффективность работы конструктора, позволяя выбирать приемлемое для него решение из фронта Парето на основе дополнительной информации, например, на основе эксплуатационных ограничений.

По результатам применения оптимизационного алгоритма получилось улучшить значение первой целевой функции в 1,5 - 2,8 раз и второй на 6 - 13 %

Список литературных источников

1. Бушуев А. Ю., Резников А. О. Применение генетического алгоритма в задаче моделирования и оптимизации пневмогидравлической системы синхронизации исполнительных органов. Математическое моделирование и численные методы. - 2021. - № 3. - С. 62-73.
2. Попов Д Н 2002 Механика гидро- и пневмоприводов (Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана) с 320
3. Иванов М Ю, Новиков А Е и Реш Г Ф 2017 Особенности проектирования и численного моделирования стабилизаторов расхода в системах синхронизации движения исполнительных органов Вестн. Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение 2 54–65 DOI: 10.18698/0236-3941-2017-1-54-65
4. Дергачев А А, Иванов М Ю, Копков Г А, Кучин А П, Новиков А Е, Реш Г Ф, Синявин В Г 2015 Регулятор расхода. Патент 2548613 РФ (Заявл. 29.01.2014, опубл. 20.04.2015) с 7
5. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике: Учеб. Для вузов – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. - 496 с.
6. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики: Учеб. для машиностроит. и приборостроит. спец. вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 607 с.
7. Попов Д.Н., Панаиотти С.С., Рябинин М.В. Гидромеханика: Учеб. для вузов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 384 с.
8. Арзуманов Ю.Л., Халатов Е.М., Чекмазов В.И., Чуканов К.П.: Математические модели систем пневмоавтоматики: Учеб. Пособие — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. — 296 с.
9. Арзуманов Ю.Л., Халатов Е.М., Чекмазов В.И. Основы проектирования систем пневмо- и гидроавтоматики: монография. Москва: Издательский дом «Спектр», 2017. — 459 с.
10. Халатов Е.М., Чекмазов В.И. Моделирование систем автоматки. Ковров: ФГБОУ ВО «КГТА им. В.А. Дегтярёва», 2016. 80 с.
11. Bushuev A.Yu., Ivanov M.Yu., Korotaev D.V. Minimization of a mismatch time of movement of actuators of a throttle synchronization system. Journal of Physics: Conference Series, 2018, V. 1141, issue 1.
12. Goldberg D E 1989 Genetic Algorithms in Search Optimizations and Machine Learning (Addison: Wesly) p 432
13. Periaux J. Genetic Algorithms for electromagnetic backscattering multiobjective optimization // Genetic algorithms for Electromagnetic Computation. — Ed: Erir. Miechelssen, 1998. — 30 с.

Спасибо за внимание!