

Оптимизация электрогидравлического усилителя для слеящего привода с дроссельным регулированием

12, декабрь 2013

DOI: 10.7463/1213.0637872

Замараев Д. С., Попов Д. Н.

УДК 62-52

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

popov@bmstu.ru

d.stalky@gmail.com

Введение

В статье рассмотрено решение задачи многокритериальной оптимизации параметров электрогидравлического усилителя (ЭГУ), обеспечивающих выполнение требований к динамическим характеристикам электрогидравлического слеящего привода (ЭГСП), которые соответствуют первому уровню оптимизации (Ур. 1) [1]. Принятое здесь разделение ЭГСП на две оптимизируемых подсистемы соответствует широко применяемой блочной структуре ЭГСП (рис. 1).

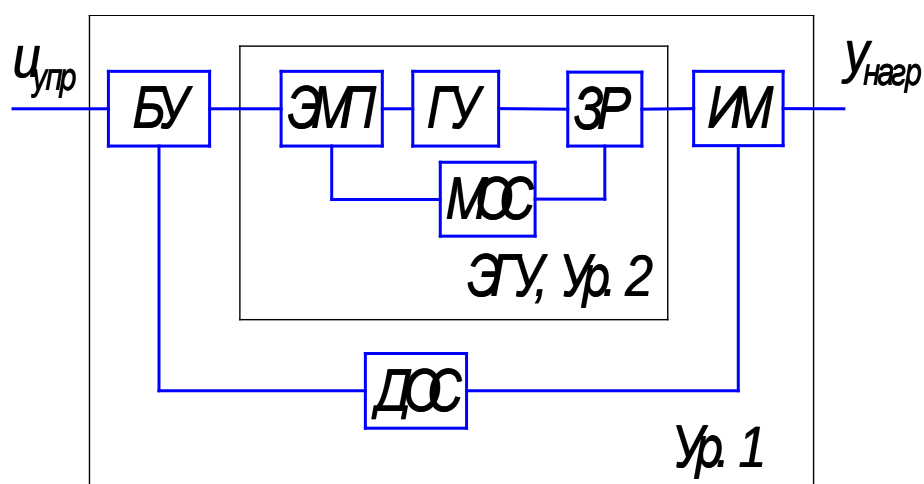


Рис. 1. Блочная структура ЭГСП.

БУ – блок управления, ЭМП – электромеханический преобразователь, ГУ – предварительная ступень усиления, ЗР – золотниковый распределитель (основная ступень усиления), МОС – механическая обратная связь по положению золотника, ИМ – исполнительный механизм (гидроцилиндр), ДОС – датчик основной обратной связи, $u_{упр}$ – сигнал управления, $y_{нагр}$ – координата управляемого объекта, создающего нагрузку на выходное звено ЭГСП

В литературе описано большое количество методов многокритериальной оптимизации [2, 3, 4, 5], каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. В связи с этим одним из этапов решения задачи многокритериальной оптимизации является выбор и обоснование метода.

Определение параметров ЭГСП основано на том, что конструктор, имея техническое задание, предварительно проектирует его принципиальную схему. Пример такой схемы с ЭГУ типа сопло-заслонка, снабженного механической обратной связью по положению золотника представлен на рис. 2. Основные конструктивные решения составляющих ЭГСП устройств широко распространены в приводах авиационных систем, станков с программным управлением, робототехнических систем и других современных систем управления [6, 7].

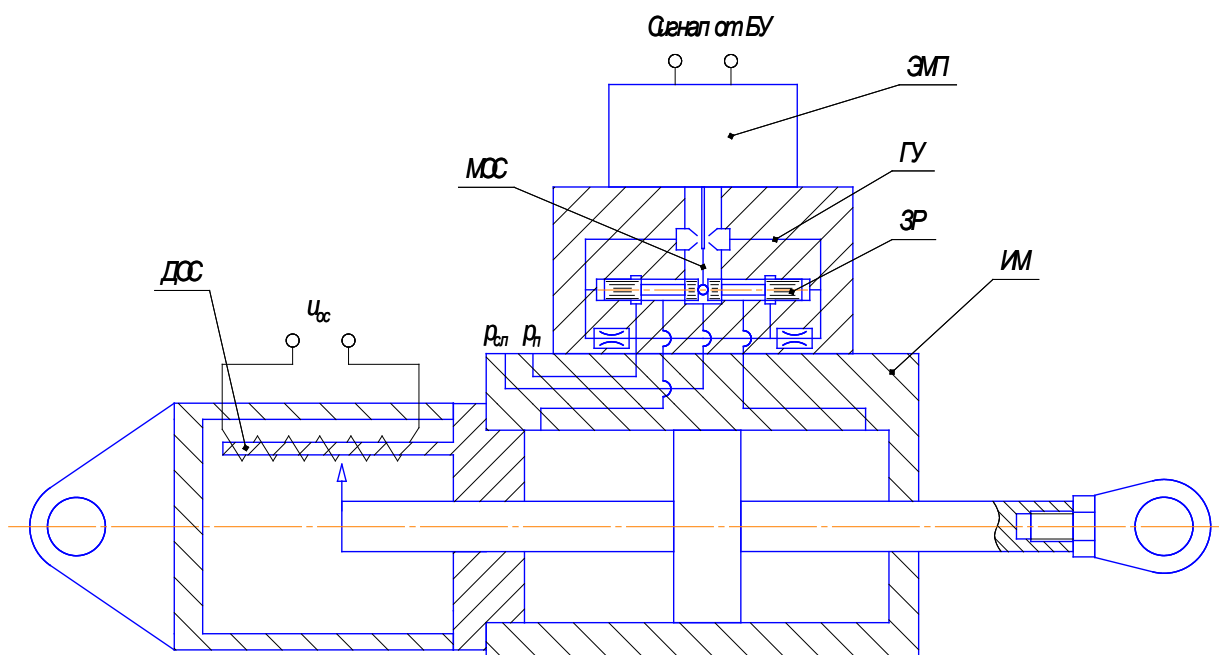


Рис. 2. Принципиальная схема ЭГСП с ЭГУ типа «сопло-заслонка» с механической обратной связью по положению золотника (СЗ с МСС).

Сокращения – см. рис. 1.

Процедура выбора параметров подсистемы второго уровня оптимизации ЭГСП (Ур. 2) состоит из следующих этапов:

1) Составление математической модели ЭГУ и определение вектора варьируемых параметров.

2) Определение критериев для минимизации отклонений характеристик проектируемого ЭГУ с различным сочетанием параметров от технического задания. Критерии $[f_l(x), f_{l+1}(x), \dots, f_m(x)]^T$, $l < m$ отбираются из вектора целевых функций и ограничений в виде $g_j(x) \geq 0$, сформированных на первом уровне оптимизации.

3) По принятой концепции оптимизации ЭГСП [1], частота пропускания ЭГУ $\omega_{\text{ЭГУ}}$ (частота, при которой фазочастотная характеристика ЭГУ пересекает уровень -90°) должна быть в 3...5 раз больше собственной частоты исполнительного механизма ω_0 . В этом случае, как показывает практика, можно рассматривать подсистему Ур. 2 в составе всего ЭГСП в виде пропорционального звена с коэффициентом передачи K_{Qi} , равном [7]:

$$k_{Qi} = \frac{Q_{\max}}{i_{y.\max}},$$

где $Q_{\max}$ – расход рабочей жидкости (РЖ) через окна золотникового распределителя при

максимальном токе управления $i_{y.max}$ в обмотках ЭМП и равенстве нулю перепада давлений между полостями исполнительного механизма.

1 Математическая модель ЭГУ и определение вектора варьируемых параметров

На этапе предварительного синтеза параметров ЭГУ для оценки его устойчивости и быстродействия применяют в практике проектирования таких устройств линеаризованную математическую модель [8]. Однако для более подробного исследования характеристик ЭГСП с целью выявления условий, при которых может изменяться качественная природа решений уравнений, описывающих работу спроектированного привода (возникать катастрофы), необходимо затем применить нелинейную математическую модель [9]. Динамические характеристики реального ЭГУ обычно отличаются от характеристик его линейной модели из-за следующих факторов:

- сухое трение в золотниковом распределителе;
- нелинейность расходно-перепадной характеристики золотникового распределителя, имеющей разрыв в нуле.

Используемые далее переменные и их соответствие составляющим ЭГУ элементам показано на рис. 3.

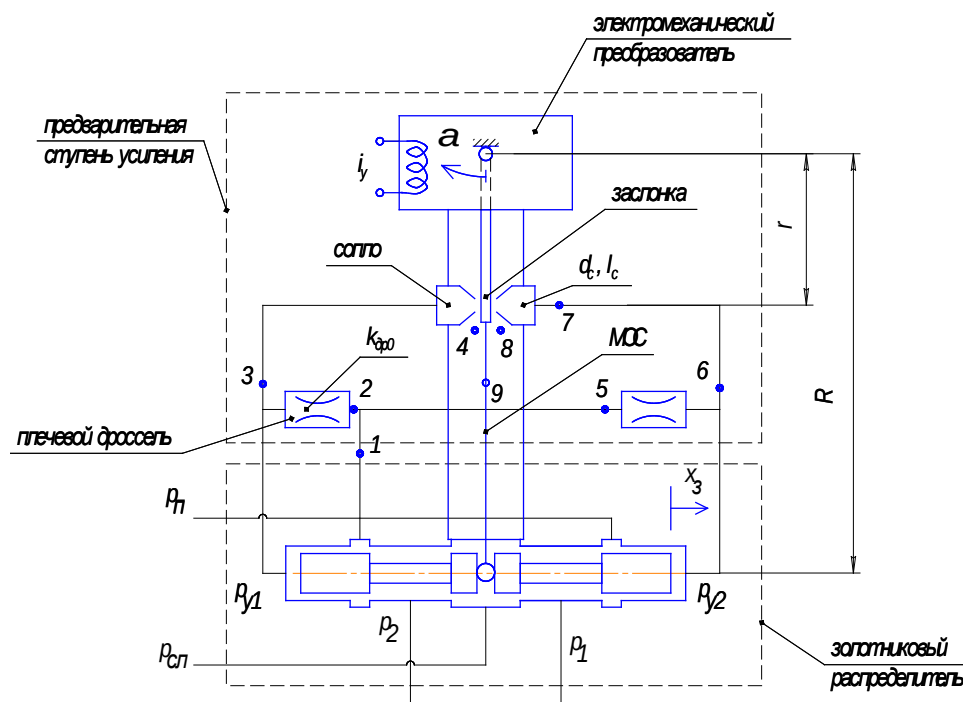


Рис. 3. Схема подсистемы Ур. 2

При формировании математической модели ЭГУ приняты следующие допущения, существенно не снижающие точность описания характеристик ЭГУ.

1) Пренебрежимо малыми считаются:

- сжимаемый объем РЖ в торцевых камерах золотникового распределителя;
- масса золотника;
- вязкое и сухое трение в паре золотник-гильза;
- непосредственное силовое воздействие упругого стержня МОС на координату золотника.

2) Смещение заслонки от нейтрального положения много меньше зазора между соплом и заслонкой при отсутствии сигнала управления.

3) Гидравлические характеристики элементов гидравлического моста предварительного каскада усиления и окон золотниковой пары симметричны.

4) Подвижная система ЭМП имеет электромагнитное демпфирование, характеризуемое апериодическим звеном $T_3 = (1 \dots 2) \cdot 10^{-3} \text{ с}$ с соответствующей собственной частотой $\omega_3 = 500 \dots 1000 \text{ с}^{-1}$ [10].

С учетом принятых допущений, математическую модель ЭГУ описывают приведенные ниже уравнения [11].

Уравнение, моментов, действующих на заслонку:

$$M_i = M_{\Pi} + M_{\text{о.с.}} + M_{\Gamma}.$$

Здесь:

– M_i – активный электромагнитный момент определяется соотношением

$$M_i = k_{Mi} \cdot i_y;$$

– M_{Π} – момент сопротивления подвижной системы электромеханического преобразователя (ЭМП) описывается апериодическим звеном, поскольку собственная частота подвижной системы ЭМП $\omega_{\text{я}} = 1/T_{\text{я}}$ в современных ЭМП более чем в 3 раза превышает частоту $\omega_3 = 1/T_3$:

$$M_{\Pi} = k_{M\alpha} \cdot \left(\frac{\dot{\alpha}}{\omega_3} + \alpha \right),$$

где α – угол поворота подвижной системы ЭМП, $k_{M\alpha} = \Delta M / \Delta \alpha$, $k_{Mi} = M_{\text{н}} / i_{\text{н}}$ – коэффициенты эластичности характеристики ЭМП, $M_{\text{н}}$ – номинальный момент на заслонке при токе управления $i_{\text{н}}$;

– $M_{\text{о.с.}}$ – момент, создаваемый механической обратной связью, определяется

выражением

$$M_{o.c.} = R \cdot c_{o.c.} \cdot x_3 + R^2 \cdot c_{o.c.} \cdot \alpha,$$

где R – расстояние от центра вращения подвижной системы ЭМП до точки контакта пружины обратной связи с золотником, $c_{o.c.}$ – жесткость пружины обратной связи, x_3 – смещение золотника от нейтрального положения;

– M_T – момент, вызванный гидравлической нагрузкой на заслонке, определяется формулой

$$M_T = r \cdot (P_{T1} - P_{T2}),$$

где r – расстояние от центра вращения подвижной системы ЭМП до оси сопел, $P_{T1,2}$ – силы воздействия потока РЖ на заслонку со стороны каждого из сопел, которые зависят от режима течения жидкости [13,14].

Результирующая сила воздействия потока РЖ на заслонку со стороны сопел при отрывном истечении:

$$\Delta P_T = P_{T1} - P_{T2} = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot (p_{31} - p_{32}) + \frac{4 \cdot \rho}{\pi \cdot d_c^2} \cdot (Q_{c1}^2 - Q_{c2}^2),$$

где d_c – диаметр сопла, $p_{31,2}$ – давления в зазорах между соплами и заслонкой, ρ – плотность РЖ, $Q_{c1,2}$ – расход через каждое сопло.

Для расчета статических характеристик предварительной ступени усиления ЭГУ гидравлический мост можно описать матрицей [14]:

$$S = \begin{pmatrix} e_1 & i_1 & j_1 & k_1 \\ e_2 & i_2 & j_2 & k_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_N & i_N & j_N & k_N \end{pmatrix},$$

где $e_{1...N}$ – обозначение типа каждого элемента, входящего в схему, N – количество элементов, i, j, k – номера узлов, соответствующих каждому элементу. Такой способ описания гидравлической схемы позволяет создать простой алгоритм расчета ее параметров при любой сложности схемы. На рис. 3 показан пример нумерация узлов для определения статических характеристик предварительной ступени усиления ЭГУ. В данном случае не учитывается сопротивление канала сопла и канализации корпуса ЭГУ.

Нелинейное уравнение, описывающее связь расхода РЖ через любой дросселирующий элемент (далее – дроссель) гидравлического моста с перепадом

давлений между входом i и выходом j имеет вид

$$Q_{i,j} = \mu(Re, d, \bar{p}) \cdot f_{др} \cdot \text{sign}(p_i - p_j) \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot |p_i - p_j|},$$

где μ – коэффициент расхода, Re – число Рейнольдса для потока РЖ в дросселе, d – геометрические параметры дросселя, $\bar{p} = p_j/p_i$ – относительное противодавление, p_i и p_j – давления на входе и выходе дросселя, $f_{др}$ – площадь проходного сечения дросселя.

Зависимости $\mu(Re, d, \bar{p})$ для различных типов элементов гидравлического моста ЭГУ приведены в работе [12].

Уравнения, описывающие делитель потока (тройник), без учета потерь давления на нем, имеют вид:

$$p_i = p_j = p_k,$$

$$Q_i = Q_j + Q_k.$$

Уравнения движения золотника без учета его массы принимает вид

$$\frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \cdot \dot{x}_3 = k_{q\alpha} \cdot \alpha - k_{q\alpha} \cdot \Delta p_{т.з.} / k_{p\alpha},$$

$$\Delta p_{т.з.} \cdot \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} = P_{гд},$$

где $\Delta p_{т.з.}$ – перепад давлений на торцах золотника, d_3 – диаметр золотника, $P_{гд}$ – гидродинамическая сила, действующая на золотник, $k_{p\alpha}$ – коэффициент усиления предварительного каскада по давлению, $k_{q\alpha}$ – коэффициент усиления предварительного каскада по расходу.

Расход РЖ, протекающей через окно золотникового распределителя, определяется известной из гидравлики формулой [7]

$$Q = k_3(\rho, t, b_{ок}, x_3, \vec{v}, \bar{p}) \cdot \sqrt{(p_{вх} - p_{вых})},$$

где $k_3(\rho, t, b_{ок}, x_3, \vec{v}, \bar{p}) = k'_3(t, x_3, \vec{v}, \bar{p}) \cdot b_{ок} \cdot \sqrt{2/\rho}$ – полученная экспериментально зависимость проводимости окна золотникового распределителя от плотности РЖ ρ ,

температуры РЖ t , суммарной ширины окон золотникового распределителя $b_{\text{ок}}$, перемещения золотника x_z , направления потока жидкости $\vec{v}$; $\bar{p} = p_{\text{вых}}/p_{\text{вх}}$ – относительное противодавление, $p_{\text{вх}}$ и $p_{\text{вых}}$ – давления на входе и выходе окна золотникового распределителя; $k'_z(t, x_z, \vec{v}, \bar{p})$ – удельная проводимость окна золотникового распределителя.

Коэффициенты линеаризованной расходно-перепадной характеристики предварительной ступени усиления типа сопло-заслонка определяются с помощью следующих соотношений

$$k_{p\alpha} = \frac{4 \cdot r \cdot (p_{\text{т.з.0}} - p_{\text{сл}})}{h_0}$$

$$k_{q\alpha} = \frac{r \cdot Q_{\text{с0}}}{h_0},$$

в которых $Q_{\text{с0}}, h_0, p_{\text{т.з.0}}$ – расход утечки через сопло, зазор между соплом и заслонкой и давление на торцах золотника при нейтральном положении заслонки.

Гидродинамическая сила, действующая на золотник со стороны потока РЖ, без учета инерции жидкости, определяется формулой [16]:

$$P_{\text{ГД}} = k'_z(\theta, x_z, \vec{v}, \bar{p}) \cdot b_{\text{ок}} \cdot (p_i - p_j) \cdot \cos \alpha_z,$$

где $k'_z(\theta, x_z, \vec{v}, \bar{p})$ – полученная экспериментально зависимость удельной проводимости окна золотникового распределителя от температуры РЖ θ , отклонения золотника от нейтрального положения x_z , направления потока РЖ через окно $\vec{v}$, относительного противодавления $\bar{p} = p_j/p_i$, $b_{\text{ок}}$ – ширина окна золотникового распределителя, p_i, p_j – давления на входе и выходе окна, α_z – угол между направлением потока РЖ, протекающего через окно золотникового распределителя и осью золотника.

Для оценки быстродействия ЭГУ можно принять:

$$P_{\text{ГД}} = c_{\text{ГД}} \cdot x_z,$$

где $c_{\text{ГД}} \approx 0,5 \cdot b_{\text{ок}} \cdot (p_{\text{п}} - p_{\text{сл}})$ – жесткость гидродинамической пружины

Таким образом, наиболее существенные динамические свойства ЭГУ описываются колебательным звеном с постоянной времени [11]:

$$T_{ЭГУ} = \sqrt{\frac{T_э \cdot T_Г}{1 + K_p}},$$

где $T_Г$ – гидравлическая постоянная времени предварительной ступени усиления:

$$T_Г = \frac{4 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_3^2}{4} \right)^2 \cdot (p_{т.з.0} - p_{сл})}{Q_{с0} \cdot (c_{о.с.} + c_{гд})}$$

K_p – коэффициент усиления разомкнутого контура:

$$K_p = \frac{k_{p\alpha} \cdot k_{о.с.}}{k_{M\alpha}} \cdot \frac{\pi \cdot d_3^2}{4 \cdot c_{гд}},$$

где $k_{о.с.} = R \cdot c_{о.с.}$ – коэффициент обратной связи при условии $R \cdot c_{о.с.} \gg r \cdot d_c^2 \cdot (c_{о.с.} + c_{гд})/d_3^2$, характерном для реальных конструкций.

Описание ЭГУ звеном второго порядка не учитывает возможные области неустойчивой работы. В связи с этим, необходимо при выборе проектного варианта ЭГУ учитывать ограничения на коэффициент усиления разомкнутого контура K_p , изложенные в ГОСТ 22750-77.

Коэффициент усиления ЭМП по моменту определяется выражением

$$k_{Mi} = \frac{(k_{о.с.} \cdot (1 + K_p^{-1})) \cdot x_{з.мах}}{i_{y.мах}}.$$

Здесь $x_{з.мах}$ – отклонение золотника от нейтрального положения при максимальном токе управления $i_{y.мах}$.

В соответствии с записанными выше уравнениями, варьируемыми параметрами для подсистемы Ур. 2 являются коэффициент усиления ЭМП по моменту $k_{M\alpha}$, расстояние от центра вращения подвижной системы ЭМП до оси сопел r , расстояние от центра вращения подвижной системы ЭМП до точки контакта упругого стержня обратной связи с золотником R , жесткость стержня обратной связи $c_{о.с.}$ (геометрические параметры, определяющие ее – диаметр и длина стержня), диаметр сопел d_c , зазор между соплом и заслонкой при отсутствии сигнала управления h_0 , диаметр плечевых дросселей $d_{др}$,

диаметр d_z золотника и максимальное отклонение золотника от нейтрального положения $x_{z.max}$.

2 Выбор критериев

Критериями при оптимизации подсистемы Ур. 2 могут быть приняты:

1) Быстродействие, характеризуемое, согласно изложенному выше, постоянной времени $T_{ЭГУ}$.

Согласно концепции оптимизации ЭГСП, на значение частоты пропускания ЭГУ наложено ограничение:

$$\omega_{ЭГУ} = \frac{1}{T_{ЭГУ}} > (3 \dots 5) \cdot \omega_0$$

2) Энергетические характеристики.

Критерием, характеризующим энергетическую эффективность привода является расход утечки РЖ при отсутствии сигнала управления ($i_y = 0$):

$$Q_{ут} = Q_{ут.предв} + Q_{ут.з},$$

где $Q_{ут.предв} = 2 \cdot Q_{с0}$ – расход утечки через предварительный каскад усиления, $Q_{ут.з}$ – расход утечки через зазоры в золотниковой паре. Целесообразно рассматривать в качестве критерия только расход утечки через предварительный каскад усиления, поскольку расходу утечки через зазоры в золотниковой паре зависит от величины зазоров и перекрытий, что является функцией технологических возможностей предприятия и требований к нагрузочной характеристике ЭГУ.

3 Решение многокритериальной задачи

В ряде работ для решения задач многокритериальной оптимизации (МКО) ЭГСП успешно апробированы метод ЛП-поиска [6, 17] и генетические алгоритмы (ГА) [18]. ГА универсальны и просты в применении. Многокритериальные модификации ГА [2] позволяют получать более полную аппроксимацию фронта Парето по сравнению с методом ЛП-поиска при меньшем участии конструктора. Сравнение эффективности ЛП-поиска и ГА, примененных к данной задаче, представлено на рис. 6 и в табл. 3.

Для выбора оптимального проектного варианта в задаче МКО, как правило, необходимо сравнивать векторные критерии, элементы которых имеют различные размерности. В связи с этим, необходимо нормировать множество, составляющее полученный в результате применения выбранного алгоритма МКО фронт Парето. Если ни

один из элементов фронта Парето не принимает нулевого значения, целесообразно нормировать пространство критериев следующим образом:

$$f'_i(\mathbf{x}) = \frac{f_i(\mathbf{x}) - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, i = 1, \dots, n,$$

где $f_i^{\min}$ – минимальное значение критерия f_i , $f_i(\mathbf{x})$ – значение критерия f_i при сочетании конструктивных параметров $\mathbf{x}$, n – количество критериев.

В качестве примера ниже рассмотрена задача оптимизации ЭГУ со следующими параметрами:

максимальный ток управления $i_y = 5 \cdot 10^{-3} \text{ А}$

расход РЖ через ЭГУ при максимальном токе управления $Q_{\max} = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

частота пропускания ЭГУ, управляющего приводом с собственной частотой $\omega_0 = 100 \text{ с}^{-1}$, не менее $\omega_{\text{ЭГУ}} = 5 \cdot \omega_0 = 500 \text{ с}^{-1}$.

Таким образом, значение постоянной времени ЭГУ должно удовлетворять условию $T_{\text{ЭГУ}} < 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Диапазон изменения варьируемых параметров и полученное оптимальное сочетание параметров ЭГУ приведены в табл. 1. Границы изменения параметров определены из соображений технологических ограничений и конструктивной реализуемости.

Таблица 1

Параметр, единица измерения	Минимальное значение параметра	Максимальное значение параметра	Исходное сочетание параметров	Оптимальное сочетание параметров
$h_0, \text{м}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$	$30 \cdot 10^{-6}$	$21 \cdot 10^{-6}$
$k_{M\alpha}, \text{Н} \cdot \text{м/рад}$	3	10	3,76	4,3
$r, \text{м}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$
$R, \text{м}$	$20 \cdot 10^{-3}$	$30 \cdot 10^{-3}$	$25,4 \cdot 10^{-3}$	$29 \cdot 10^{-3}$
$c_{0.c}, \text{Н/м}$	450	1200	500	1175
$d_c, \text{м}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$0,51 \cdot 10^{-3}$	$0,68 \cdot 10^{-3}$
$d_{др}, \text{м}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,16 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$
$d_3, \text{м}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$
$x_{3.max}, \text{м}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{-3}$	$0,34 \cdot 10^{-3}$

Для оценки качества проектного варианта использованы критерии, описанные выше:

- 1) Постоянная времени ЭГУ $T_{ЭГУ}$
- 2) Расход непроизводительной утечки через предварительный каскад $Q_{ут.предв}$

При помощи многокритериальной модификации ГА NSGA-II получен набор точек, лежащих на границе Парето (аппроксимация фронта Парето) (рис. 4). Затем полученный набор точек нормирован описанным выше способом (рис. 5).

Для получения большего разнообразия проектных вариантов и более равномерного распределения точек на аппроксимации фронта Парето в алгоритме NSGA-II предусмотрена процедура оценки расстояния между точками в пространстве многих критериев. Для того, чтобы исключить влияние размерности критериев на вид аппроксимации фронта Парето, оценка расстояния между точками должна производиться для каждого поколения на основе нормированных значений критериев.

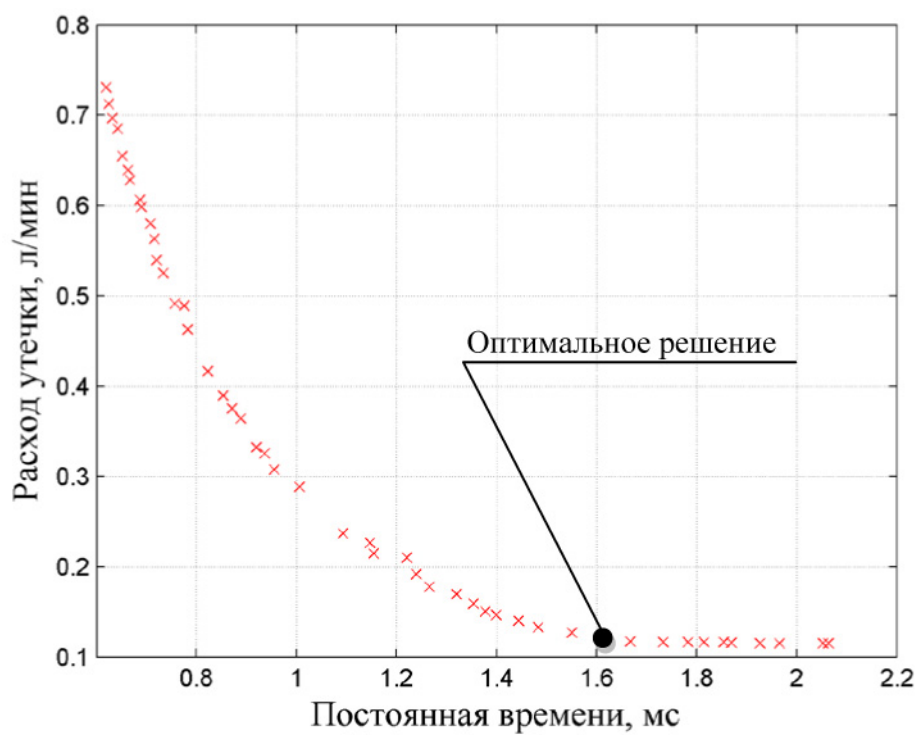


Рис. 4. Аппроксимация фронта Парето

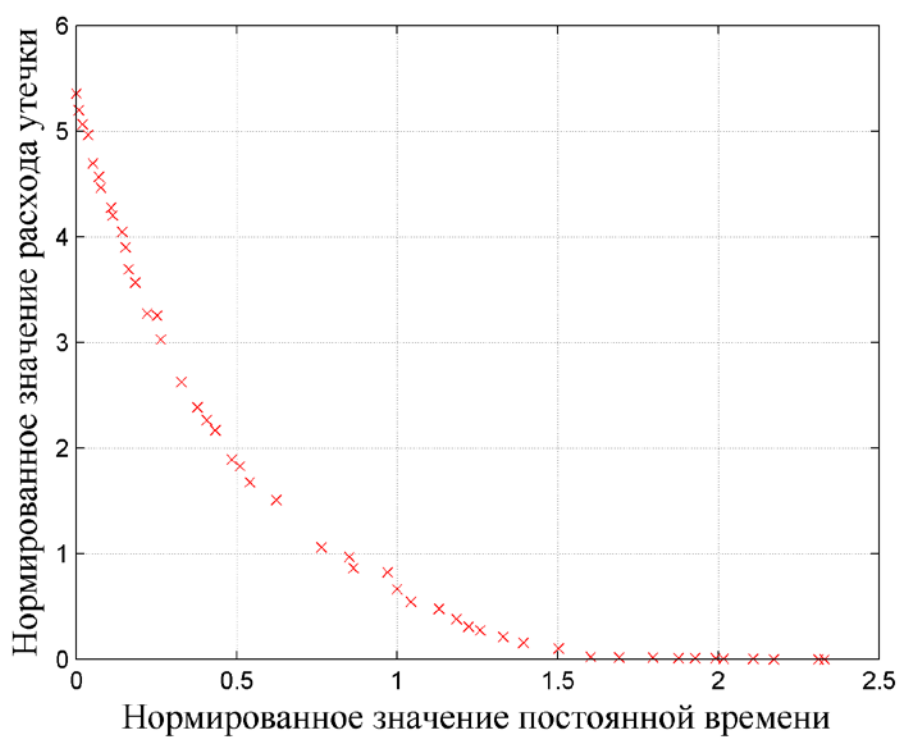


Рис. 5. Нормированный фронт Парето

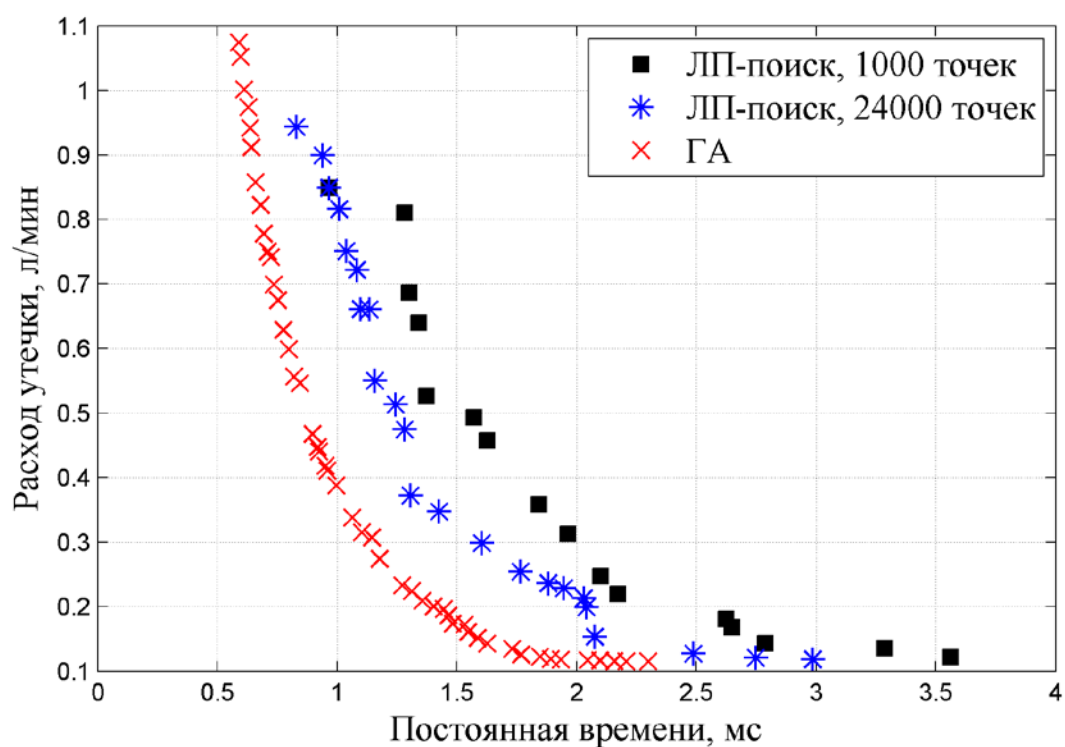


Рис. 6. Сравнение решений задачи МКО ЭГУ методами ГА и ЛП-поиска с различным количеством рассчитываемых точек

Из соображений обеспечения требуемого быстродействия ЭГУ при минимальной гидравлической мощности, необходимой для управления приводом, в пространстве критериев выбрана точка (табл. 2), и получено оптимальное решение (табл. 1).

Таблица 2

Критерий	Исходное значение	Оптимальное значение
Постоянная времени ЭГУ $T_{ЭГУ}$, с	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
Расход непроизводительной утечки через предварительный каскад усиления, $Q_{ут.предв}$, л/мин (% максимального расхода через ЭГУ)	0,32 (2,5)	0,12 (1,0)

Таблица 3

Способ получения аппроксимации фронта Парето	Время вычисления, с
ЛП-поиск на основе 10^3 точек	28
ЛП-поиск на основе $24 \cdot 10^3$ точек	675
ГА NSGA-II, 18500 точек	530

Заключение

Применение таких алгоритмов МКО, как ЛП-поиск и ГА предусматривает получение множества оптимальных по Парето решений – точек, лежащих на фронте Парето, – и последующий выбор оптимального сочетания конструктивных параметров на основе неформализуемых критериев, известных конструктору. Для второго уровня оптимизации ЭГСП целесообразно применять многокритериальную модификацию ГА NSGA-II для получения аппроксимации фронта Парето, а затем выбирать решение из соображений обеспечения потребного быстродействия ЭГУ при минимальной гидравлической мощности, необходимой для управления приводом.

В результате сравнения эффективности ГА и ЛП-поиска показано, что, в применении к рассматриваемой задаче МКО, ГА позволяет получить большее количество точек, лежащих на границе Парето с более равномерным распределением по границе при меньшем участии конструктора.

Из-за технологических ограничений, некоторые конструктивные параметры (например, диаметр золотника, диаметры сопел и дросселей, длина упругой струны) ЭГСП принимают дискретные значения. Для решения таких задач необходимо модифицировать процедуры ГА, участвующие в создании поколений (функции создания начальной популяции, скрещивания и мутации).

Рассмотренный в статье второй уровень оптимизации ЭГСП с дроссельным регулированием соответствует концепции оптимизации, изложенной в [1]. Научная новизна заключается в постановке и решении задачи многокритериальной оптимизации электрогидравлического усилителя мощности (ЭГУ), как реализации предложенной концепции.

Список литературы

1. Замараев Д.С., Попов Д.Н. Концепция оптимизации электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 6. DOI: [10.7463/0613.0569281](https://doi.org/10.7463/0613.0569281)
2. Deb K. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. NY: John Wiley & Sons, Inc., 2001.
3. Marler R.T., Arora J.S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering // Struct. Multidiscip. Optim. 2004. No. 26. P. 369-395.
4. Карпенко А.П. Аппроксимация функции предпочтений лица, принимающего решения, в задаче многокритериальной оптимизации. 3. Методы на основе нейронных сетей и нечеткой логики // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2008. № 4. Режим доступа: <http://www.technomag.edu.ru/doc/363023.html> (дата обращения 17.10.2013).
5. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Дрофа, 2006. 175 с.
6. Боровин Г.К., Попов Д.Н. Многокритериальная оптимизация гидросистем: учеб.пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 94 с.
7. Попов Д.Н., Асташев В.К., Густомясов А.Н. и др. Машиностроение: энциклопедия. В 40 т. Т. IV-2 : Электропривод. Гидро- и виброприводы. Кн. 2: Гидро- и виброприводы / под ред. В.К. Асташева, Д.Н. Попова. М.: Машиностроение, 2012. 303 с.
8. Константинов С.В., Редько П.Г., Ермаков С.А. Электрогидравлические рулевые приводы систем управления полетом маневренных самолетов. М.: “Янус-К,” 2006. 316 с.
9. Попов Д.Н. Механика гидро- и пневмоприводов: учебник для машиностроительных вузов. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 320 с.
10. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф: пер. с англ. 2-е изд. М.: Мир, 1984. 285 с.
11. Сосульников Г.Б., Иванов А.П. Линеаризация передаточной функции электромеханического преобразователя с эффективным демпфированием подвижной системы // Пневматика и гидравлика. Приводы и управление: сб. науч. трудов. Вып. 14. 1989. С. 265-268.
12. Фомичев В.М. Преимущества электрогидравлических усилителей с механической обратной связью // Вестник машиностроения. 1975. № 4. С. 11-
13. Попов Д.Н., Ермаков С.А., Лобода И.Н. и др. Инженерные исследования гидроприводов летательных аппаратов / под ред. Д.Н. Попова. М.: Машиностроение, 1978. 142 с.

14. Бирюков О.Я., Котлов А.В., Фомичев В.М. Границы кавитационных режимов в устройстве сопло-заслонка // Вестник машиностроения. 1974. № 2. С. 18-21.
15. Бажин И.И., Беренгард Ю.Г., Гайцгори М.М., Ермаков С.А., Клапцова Т.С., Кудинов А.В., Чкалов В.В. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / под общ. ред. С.А. Ермакова. М.: Машиностроение, 1988. 312 с.
16. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение, 1976. 424 с.
17. Коркодинов Д.В., Попов Д.Н. Оптимальное проектирование следящего электрогидравлического привода с дроссельным регулированием // Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» (Москва, 9 декабря 2010 г.) : сб. докл. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 124-128.
18. Andersson J., Krus P., Wallace D. Multi-objective optimization of hydraulic actuation systems // Proceedings of the 2000 ASME Design Automation Conference (DETC'00) (Baltimore, MD, 10-13 September 2000). DAC-14512. Режим доступа: <http://cadlab.mit.edu/publications/00-andersson-asme-dt/dontindex/00-andersson.pdf> (дата обращения 17.10.2013).

Optimization of an electrohydraulic actuator for a servo drive with throttle control

12, December 2013

DOI: [10.7463/1213.0637872](https://doi.org/10.7463/1213.0637872)

Zamaraev D.S., Popov D.N.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

popov@bmstu.ru
d.stalky@gmail.com

The paper presents a problem-solving procedure for selecting parameters of an electrohydraulic actuator in order to reduce response time and hydraulic power consumption. To perform such optimization design variables of an electrohydraulic servo drive were selected; objectives were proposed to estimate design alternatives. An example of two-criterion optimization of a servo drive with throttle control was presented. These criteria were control flow and response time. Multi-objective modification of a genetic algorithm was used to obtain a Pareto front approximation. The concept described in this paper is based on generalization of optimization methods for the electrohydraulic servo actuator known from literature references and includes new proposals on the algorithm structure

Publications with keywords: [genetic algorithm](#), [multiobjective optimization](#), [electrohydraulic servo actuator](#)

Publications with words: [genetic algorithm](#), [multiobjective optimization](#), [electrohydraulic servo actuator](#)

References

1. Zamaraev D.S., Popov D.N. Kontseptsiya optimizatsii elektrogidravlicheskogo sledyashchego privoda s drossel'nyim regulirovaniem [Concept of optimization of an electrohydraulic servo drive with throttle regulation]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2013, no. 6. DOI: [10.7463/0613.0569281](https://doi.org/10.7463/0613.0569281)
2. Deb K. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. NY, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
3. Marler R.T., Arora J.S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Struct. Multidiscip. Optim.*, 2004, no. 26, pp. 369-395.

4. Karpenko A.P., Fedoruk V.G. *Approximation of functions of preferences of decision maker in the problem of multi-criteria optimization. 3. Methods on the basis of neural networks and fuzzy logic*. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2008, no. 4. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/86335.html> , accessed 26.09.2013.
5. Sobol' I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriiami* [Choice of the optimum parameters in problems with many criteria]. Moscow, Drofa, 2006. 175 p.
6. Borovin G.K., Popov D.N. *Mnogokriterial'naya optimizatsiya gidrosistem* [Multi-criteria optimization of hydraulic systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007. 94 p.
7. Popov D.N., Astashev V.K., Gustomiasov A.N., et al. *Mashinostroenie: entsiklopediya. V 40 t. T. 4-2: Elektroprivod. Gidro- i vibroprivody. Kn. 2: Gidro- i vibroprivody* [Mechanical Engineering: Encyclopedia. In 40 vols. Vol. 4-2: Electric actuator. Hydraulic and vibro actuators. Book 2: Hydraulic and vibro drives]. Moscow, Mashinostroenie, 2012. 303 p.
8. Konstantinov S.V., Red'ko P.G., Ermakov S.A. *Elektrohidravlicheskie rulevye privody sistem upravleniya poletom manevrennykh samoletov* [Electrohydraulic steering actuators of control systems of flight of maneuverable aircraft]. Moscow, Yanus-K, 2006. 316 p.
9. Popov D.N. *Mekhanika gidro- i pnevmoprivodov* [Mechanics of hydraulic and pneumatic actuators]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 320 p.
10. Gilmore R. *Catastrophe Theory for Scientists and Engineers*. New York, Dover Publications, 1981. (Russ. ed.: Gilmore R. *Prikladnaya teoriya katastrof. V 2 t. T. 2*. Moscow, Mir, 1984. 285 p.).
11. Sosul'nikov G.B., Ivanov A.P. *Linearizatsiya peredatochnoy funktsii elektromekhanicheskogo preobrazovatelya s effektivnym dempfirovaniem podvizhnoy sistemy* [Linearization of transfer function of electromechanical transducer with an effective damping of the moving system]. *Pneumatika i gidravlika. Privody i upravlenie: sb. nauch. trudov* [Pneumatics and hydraulics. Actuators and control: collection of scientific papers]. Is. 14, 1989, pp. 265-268.
12. Fomichev V.M. *Preimushchestva elektrogidravlicheskiykh usiliteley s mekhanicheskoy obratnoy svyaz'yu* [Advantages of electro-hydraulic power with mechanical feedback]. *Vestnik mashinostroeniya*, 1975, no. 4, pp. 11-14.
13. Popov D.N., Ermakov S.A., Loboda I.N., et al. *Inzhenernye issledovaniya gidroprivodov letatel'nykh apparatov* [Engineering studies of aircraft hydraulic actuators]. Moscow, Mashinostroenie, 1978. 142 p.
14. Biryukov O.Ya., Kotlov A.V., Fomichev V.M. *Granitsy kavitatsionnykh rezhimov v ustroystve soplo-zaslonka* [Boundaries of cavitation regimes in device nozzle-shutter]. *Vestnik mashinostroeniya*, 1974, no. 2, pp. 18-21.
15. Bazhin I.I., Berengard Iu.G., Gaitsgori M.M., Ermakov S.A., Klaptsova T.S., Kudinov A.V., Chkalov V.V. *Avtomatizirovannoe proektirovanie mashinostroitel'nogo gidroprivoda*

[Automated design of machine building hydraulic actuator]. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 312 p.

16. Popov D.N. *Dinamika i regulirovanie gidro- i pnevmosistem* [Dynamics and regulation of hydro - and pneumatic systems]. Moscow, Mashinostroenie, 1976. 424 p.

17. Korkodinov D.V, Popov D.N. Optimal'noe proektirvoanie slediashchego elektrogidravlichesкого privoda s drossel'nym regulirovaniem [Optimal designing of electro-hydraulic servo with throttle regulation]. *Gidravlicheskie mashiny, gidroprivody i gidropnevmavtomatika: trudy Vserossiiskoi nauch.-tekhn. konf. studentov i aspirantov* [Proc. of the all-Russian scientific-technical conf. of the students and post-graduate students "Hydraulic machines, hydraulic actuators and hydro-pneumo-automatics"]. Moscow, 9 December, 2010, Moscow, MEI Publishing House, 2010, pp. 124-128.

18. Andersson J., Krus P., Wallace D. Multi-objective optimization of hydraulic actuation systems. *Proceedings of the 2000 ASME Design Automation Conference (DETC'00)*, Baltimore, MD, 10-13 September, 2000, DAC-14512. Available at: <http://cadlab.mit.edu/publications/00-andersson-asme-dt/dontindex/00-andersson.pdf> , accessed 17.10.2013.