

Концепция оптимизации электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием

06, июнь 2013

DOI: 10.7463/0613.0569281

Попов Д. Н., Замараев Д. С.

УДК 62-52

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

popov@bmstu.ru

d.stalky@gmail.com

Введение

В системах управления разнообразными объектами широкое применение в качестве исполнительных механизмов получили электрогидравлические следящие приводы (ЭГСП), управляемые электрогидравлическими усилителями мощности (ЭГУ). Такие приводы во многом определяют динамические характеристики всей системы управления, ее надежность, энергетические показатели и массу составляющих систему устройств. Несмотря на большой объем научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых при создании ЭГСП, к настоящему времени еще не решена проблема выбора оптимальных проектных вариантов. Это ограничивает возможности достижения прорывных результатов при разработке новых образцов ЭГСП. Сложность указанной проблемы состоит в том, что для выбора оптимального проектного варианта ЭГСП необходимо учитывать ряд противоречащих друг другу требований, обеспечивающих оптимальность всей системы управления [1-3]. При этом существующая практика создания новых ЭГСП часто основана на опыте конструктора и его интуиции, что не гарантирует оптимальность принятых решений вследствие неполного отражения влияния параметров на характеристики проектируемого изделия. Рассмотренная в статье концепция имеет научную новизну, содержащуюся в методике последовательной оптимизации с выделением двух уровней ЭГСП.

1 Постановка задачи многокритериальной оптимизации

Многокритериальную задачу определения оптимального проектного варианта в общем виде можно сформулировать следующим образом [4], [5]:

$$\text{Минимизировать } \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})]^T$$

$$\text{при условии } g_j(\mathbf{x}) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p,$$

где $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbf{X}$ – n -мерный вектор управляющих варьируемых параметров, \mathbf{X} – пространство допустимых значений варьируемых параметров; $f_i(\mathbf{x}) \in \mathbf{Z}$ – целевые функции (критерии), \mathbf{Z} – пространство допустимых значений критериев, определяемое, как множество $\{\mathbf{f}(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in \mathbf{X}\}$; и $g_j(\mathbf{x}) \geq 0$ – система ограничений, накладываемых на проектное решение техническим заданием.

Следует заметить, что многие варьируемые параметры в задаче оптимизации любого технического устройства необходимо выбирать из рядов предпочтительных размеров и располагаемой номенклатуры унифицированных аппаратов или сборочных единиц.

Критерии, как правило, противоречивы, в связи с чем не существует математически строгих решений, доставляющих одновременно всем целевым функциям экстремальные значения. В таких случаях рассматривают «эффективные решения» \mathbf{x}^* – такие, в которых невозможно улучшить значение любого из критериев без ухудшения значений одного или нескольких других критериев [6]. Это условие называют принципом Парето, а множество всех эффективных решений – множеством Парето.

2 Методы решения задачи многокритериальной оптимизации

Один из способов выбора решения задачи многокритериальной оптимизации (МКО) из множества Парето – применение аппроксимированной функции предпочтений конструктора, представленной в виде той или иной свертки нормализованных критериев [7]. Аппроксимация функции предпочтений конструктора, как правило, требует анализа большого количества вариантов, составляющих множество Парето, что может оказаться весьма трудоемким процессом. Данную проблему можно решить при помощи метода последовательной оптимизации [8], суть которого состоит в том, что объект оптимизации рассматривают в виде иерархической структуры, каждый уровень которой должен быть оптимизирован по своему набору критериев. Синтез параметров очередного уровня производят с учетом уже синтезированной по своему набору критериев подсистемы предыдущего уровня. ЭГСП

можно представить в виде блочной структуры с двумя уровнями последовательной оптимизации (рис. 1).

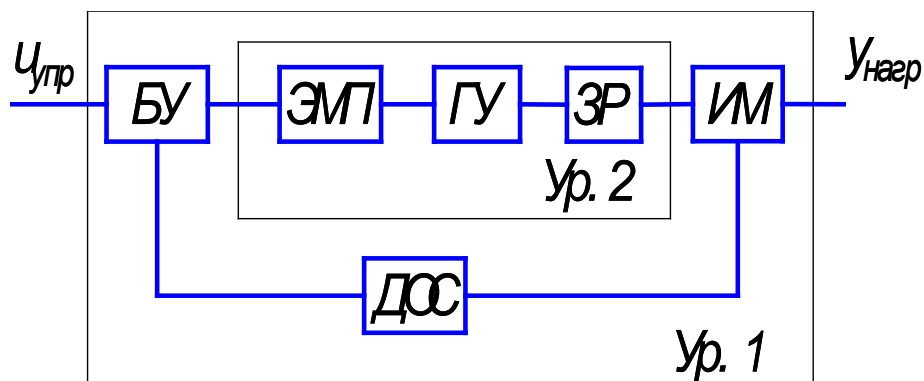


Рис. 1. Блочная структура ЭГСП.

БУ – блок управления, ЭМП – электромеханический преобразователь, ГУ – предварительная ступень гидроусиления, ЗР – золотниковый распределитель (основная ступень усиления), ИМ – исполнительный механизм (гидроцилиндр), ДСС – датчик обратной связи, Ур. 1 – первый уровень иерархической структуры, Ур. 2 – второй уровень иерархической структуры, $U_{упр}$ – сигнал управления, $U_{нагр}$ – координата управляемого

объекта

Ниже предложен метод выбора параметров ЭГСП основанный на том, что конструктор, имея техническое задание, предварительно разрабатывает его принципиальную схему. Пример такой схемы представлен на рис. 2.

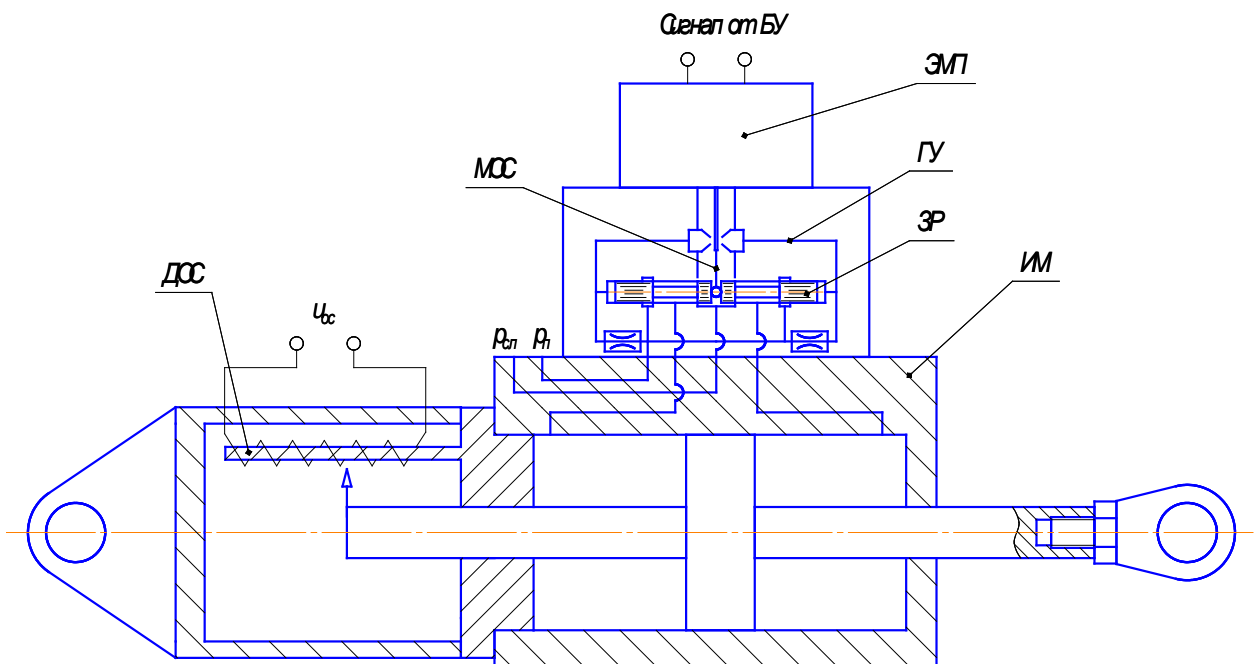


Рис. 2. Схема ЭГСП с ЭГУ типа «сопло-заслонка» с механической обратной связью по положению золотника (СЗ с МСС)

Процедура дальнейшего проектирования привода состоит из следующих этапов:

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

2) Выбор критериев в виде вектора целевых функций $[f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T$ и ограничений в виде $g_j(x) \geq 0, j = 1, 2, \dots, p$ для минимизации отклонений характеристик проектируемого ЭГСП с различным сочетанием параметров от технического задания.

3) Как показывает практика [3], при условии, что частота пропускания ЭГУ $\omega_{ЭГУ}$ (частота, при которой фазочастотная характеристика ЭГУ пересекает уровень -90°) в 3...5 раз больше собственной частоты ИМ ω_0 , можно рассматривать подсистему Ур. 2 в составе всего ЭГСП, как пропорциональное звено с коэффициентом передачи k_{Qi} :

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

где Q_{max} – расход рабочей жидкости через окна ЗР при максимальном токе управления $i_{y,max}$ в обмотках ЭМП и отсутствии перепада давлений между полостями ИМ. Схема подсистемы Ур. 1 представлена на рис. 3.

3 Математическая модель ЭГСП

На этапе синтеза базовых параметров ЭГСП для оценки его устойчивости и быстродействия можно использовать линеаризованную математическую модель [9]. Однако для более подробного исследования характеристик и выявления режимов работы спроектированного привода необходимо применять нелинейную математическую модель. Динамические характеристики реального ЭГСП могут отличаться от характеристик его линейной модели вследствие влияния ряда факторов:

- сухого трения в ЗР и ИМ, или в устройствах, нагружающих выходное звено ИМ;
- вида функции, описывающей расходно-перепадную характеристику ЗР, с разрывом в нуле.

С учетом изложенного выше, можно составить нелинейную математическую модель ЭГСП.

Варьируемыми параметрами для подсистемы Ур. 1 являются развиваемое ИМ усилие, максимальная скорость и максимальный ход выходного звена ИМ (из соображений обеспечения заданной выходной мощности ЭГСП).

Математическую модель гидроусилителя с предварительной ступенью усиления в виде сопла-заслонки и с упругим стержнем обратной связи (гидроусилитель с сервоуправлением) можно составить при помощи методик, изложенных в [9-12].

Варьируемыми параметрами подсистемы Ур. 2 для ЭГУ СЗ с МОС являются: ход и диаметр золотника, ширина окон ЗР, диаметры и длины сопел, зазор между соплом и заслонкой, геометрические параметры плечевого дросселя, а также допуски на параметры элементов гидромоста, длина и жесткость струны обратной связи и расположение оси сопел относительно центра вращения подвижной системы ЭМП, моментные характеристики ЭМП, параметры питания ЭМП.

4 Выбор критериев для оценки проектных вариантов ЭГСП

Для подсистемы Ур. 1.

1) Целесообразно прежде всего выделить критерии, характеризующие соотношение мощности и массы ИМ [13].

2) Затем определяются динамические показатели, выбираемые в соответствии с техническим заданием на ЭГСП. Для ЭГСП, используемых в авиационных системах управления, они представлены в виде [3], [14]:

- требований на величину резонансного пика на логарифмической частотной характеристике $L_{рез}$ (как правило, не более 1...2 Дб), и частоту пропускания $\omega_{пп}$ при логарифмическом значении амплитуд -3...-6 Дб для замкнутого контура привода;

– требований к фазочастотным характеристикам ЭГСП в виде ограничений на максимальный фазовый сдвиг перемещения выходного звена относительно входного сигнала в заданном диапазоне частот;

– требований к динамической жесткости привода [15]. Такие требования к ЭГСП предъявляются при необходимости демпфирования колебаний управляемого объекта в случае отсутствия специальных демпфирующих устройств. Динамическая жесткость определяется, как комплексное отношение возмущающей силы, действующей на выходное звено ЭГСП, к перемещению выходного звена, вызванному этим возмущением. Для обеспечения демпфирования управляемого объекта ЭГСП должен во всем диапазоне частот иметь фазо-частотную характеристику динамической жесткости максимально близкую к $+90^\circ$ и значение динамической жесткости не меньшую определенной в техническом задании.

В случае невозможности выполнения требований к динамическим характеристикам путем варьирования конструктивных параметров, целесообразно вводить в структуру привода корректирующие устройства [3].

3) Энергетические характеристики.

С точки зрения обеспечения оптимальных энергетических характеристик, следует отметить случай, когда требования к предельной механической характеристике привода заданы скоростью выходного звена привода V_P при требуемой нагрузке P , а также минимальной $P_{разв.min}$ и максимальной $P_{разв.max}$ развиваемой приводом силы. При таком сочетании требований технического задания можно получить чрезмерно большой потребляемый расход в режиме холостого хода. Несложно показать, что минимальное значение потребляемого расхода может быть получено при соотношении $P_{разв} = \frac{3}{2} \cdot P$. При этом развиваемое усилие может превысить $P_{разв.max}$. В таком случае для обеспечения требований ТЗ в структуру привода для ограничения развиваемой силы необходимо вводить нелинейную обратную связь по перепаду давления в гидродвигателе, либо применять на выходном звене гидropружину.

4) Массогабаритные характеристики. На этапе формирования требований к следящему приводу его габариты определяют следующие параметры: максимальная развиваемая приводом сила $P_{разв}$, максимальный ход выходного звена u_{max} , максимальная скорость выходного звена V_{max} . Таким образом, максимальную мощность, потребляемую приводом (без учета КПД кинематической передачи от выходного звена привода к

управляемому объекту), учитывая предельную механическую характеристику дроссельного гидропривода [9], можно оценить, как

$$N_{max} = P_{разв} \cdot V_{max} = Q_{max} \cdot (p_{п} - p_{сл}),$$

где $p_{п}$ и $p_{сл}$ – давления питания и слива в гидросистеме, Q_{max} – максимальный расход, потребляемый приводом.

Таким образом, можно однозначно определить типоразмер ЭГУ.

В свою очередь, параметры (габариты и масса) исполнительного гидроцилиндра зависят от выбора коэффициента передачи от выходного звена привода до управляемого объекта.

5) Надежность следящего привода. Требования по надежности, предъявляемые к ЭГСП, как к части системы управления объектом, являются определяющими при выборе степени резервирования всего привода или его частей. На этапе проектирования надежность структуры привода можно продемонстрировать расчетным методом на основе данных об эксплуатации агрегатов с аналогичными конструктивными решениями, работающих в похожих условиях эксплуатации [16]. Однако полученные в результате расчета показатели надежности можно использовать лишь в качестве грубой оценки, подтверждающей соответствие разработанного привода техническому заданию. Таким образом, показатели надежности, указанные в техническом задании на проектирование привода можно использовать лишь в качестве ограничений в задаче оптимизации параметров привода. Применение расчетных показателей надежности в качестве критериев для сравнения близких конструктивных решений нецелесообразно, но необходимо учитывать требования по резервированию привода для обеспечения надежности всей системы управления.

Для подсистемы Ур. 2 целесообразно выделить следующие критерии, определяющие качество конструктивного решения:

1) Динамические показатели.

Быстродействие ЭГУ можно оценить частотой входного сигнала при фазовом сдвиге выходного сигнала (перемещения золотника) относительно входного на 90° .

2) Энергетические характеристики. Расход утечки через предварительную ступень должен быть не более 2-3% максимального номинального расхода жидкости через золотниковый распределитель (основная ступень гидроусилителя), и для повышения энергетической эффективности гидроусилителя необходимо этот расход уменьшать.

3) Чувствительность ЭГУ к изменению внешних параметров. В процессе эксплуатации изменение таких параметров, как температуры рабочей жидкости и

окружающей среды, давления питания и слива, напряжения питания датчиков и обмоток ЭГУ, может существенно менять характеристики привода – статические (максимальная скорость выходного звена, смещение нуля, зона нечувствительности) и динамические (ЛАХ и ФЧХ). Таким образом, одна из целей выбора оптимальных параметров подсистему Ур. 2 – минимизация чувствительности ЭГУ к изменению внешних параметров.

5 Решение задачи многокритериальной задачи

Как показано в ряде работ, для многокритериальной оптимизации ЭГСП целесообразно применять метод ЛП-поиска [4], [17], [18] или генетические алгоритмы [19].

Заключение.

Предлагаемый подход к оптимизации ЭГСП по многим критериям состоит из трех частей.

Первая часть – выбор конструктивной схемы привода в интерактивном режиме работы конструктора, который применяет на данном этапе в основном такие неформализуемые критерии, как опыт создания подобных изделий на близкие к техническому заданию требования.

Вторая часть – выбор параметров, обеспечивающих наименьшее расхождение между расчетными и требуемыми техническим заданием характеристиками при помощи концепции блочной оптимизации. В этой части целесообразно использовать генетические алгоритмы или метод ЛП-поиска.

Третья часть ориентирована на отбор из полученных во второй части решений наиболее подходящих для решения поставленной в техническом задании задачи.

Алгоритмы вычисления и исследования по каждой части будут приведены в следующих статьях.

Список литературы

1. Воронов Е.М. Многокритериальный синтез позиционного управления на основе многопрограммной стабилизации. Ч. 1 // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2012. № 2 . С. 3-20.
2. Редько П.Г., Ермаков С.А., Константинов С.В. Электрогидравлические рулевые приводы систем управления полетом маневренных самолетов. М.: "Янус-К", 2006. 316 с.
3. 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.

4. Боровин Г.К., Попов Д.Н. Многокритериальная оптимизация гидросистем: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 94 с.
5. Arora J.S., Marler R.T. Survey of multi-objective optimization methods for engineering // Struct. Multidisc. Optim. 2004. Vol. 26, no. 6. P. 369-395. DOI: 10.1007/s00158-003-0368-6
6. Подиновский В.В., Ногин В.О. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Физматлит, 2007. 256 с.
7. 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://technomag.edu.ru/doc/86335.html> (дата обращения 22.03.2013).
8. Колесников А.А. Последовательная оптимизация нелинейных агрегированных систем управления. М.: Энергоатомиздат, 1987. 160 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. 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.
11. 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.
12. Фомичев В.М. Расчет характеристик электрогидравлических усилителей мощности с учетом температуры жидкости // Вестник машиностроения. 1973. № 10. С. 31-34.
13. Попов Д.Н. Оценка эффективности и оптимальное проектирование гидроприводов // Вестник машиностроения. 1986. № 9. С. 20-23.
14. Редько П.Г. Повышение безотказности и улучшение характеристик электрогидравлических следящих приводов. М.: Янус-К; ИЦ МГТУ "Станкин", 2002. 232 с.
15. Склянский Ф.И., Шумилов И.С., Гониодский В.И.. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
16. Сырицын Т.А. Надежность гидро- и пневмопривода. М.: Машиностроение, 1981. 216 с.
17. Статников Р.Б., Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Дрофа, 2006. 175 с.
18. Коркодинов Д.В., Попов Д.Н. Оптимальное проектирование следящего электрогидравлического привода с дроссельным регулированием // Гидравлические

машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: труды Всероссийской науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (Москва, 9 декабря 2010 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 124-128.

19. Andersson J., Krus P., Wallace D. Multi-objective optimization of hydraulic actuation systems // Proceedings of the ASME DT Conferences, DETC/DAC-14512, Baltimore, MD, 2000.

Concept of optimization of an electrohydraulic servo drive with throttle regulation

06, June 2013

DOI: 10.7463/0613.0569281

Popov D.N., Zamaraev D.S.

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

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

This paper presents a technique of sequential optimization of an electrohydraulic servo drive. The electrohydraulic servo drive was considered as a set of subsystems of level 1 (Lv. 1) and level 2 (Lv. 2). At level 1 the electrohydraulic servo drive was considered together with an electrohydraulic servo valve replaced with a proportional link. A two-stage nozzle-flapper servo valve with mechanical feedback from the spool to the flap was selected at level 2. Objective functions were proposed to estimate project variants of each subsystem. Optimization by investigation of parameter space using the method based on the LP-sequences or genetic algorithms were presumed to be suitable. The concept described in the article is based on generalization of methods of electrohydraulic servo actuator optimization, which are known in the literature, and includes new proposals on the structure of the optimization algorithm.

Publications with keywords: [multiobjective optimization](#), [drosselling hydraulic actuator](#), [electrohydraulic servo actuator](#), [EHSA](#)

Publications with words: [multiobjective optimization](#), [drosselling hydraulic actuator](#), [electrohydraulic servo actuator](#), [EHSA](#)

References

1. Voronov E.M. Mnogokriterial'nyi sintez pozitsionnogo upravleniia na osnove mnogoprogramnoi stabilizatsii. Ch. 1 [Multiple-criteria synthesis of positional control based on multiprogram stabilization. Part 1]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 2012, no. 2, pp. 3-20.
2. Red'ko P.G., Ermakov S.A., Konstantinov S.V. *Elektrohidravlicheskie rulevye privody sistem upravleniia poletom manevrennykh samoletov* [Electro-hydraulic steering drives of systems of control of flight of maneuverable aircraft]. Moscow, "Ianus-K", 2006. 316 p.

3. Popov D.N., Astashev V.K., Gustomiasov A.N., et al. *Mashinostroenie: entsiklopediia. 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 drive. Hydraulic and vibro drives. Book 2: Hydraulic and vibro drives]. Moscow, Mashinostroenie, 2012. 303 p.
4. Borovin G.K., Popov D.N. *Mnogokriterial'naia optimizatsiia gidrosistem* [Multi-criteria optimization of hydraulic systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007. 94 p.
5. Arora J.S., Marler R.T. Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Struct. Multidisc. Optim.*, 2004, vol. 26, , no. 6, pp. 369-395. DOI: 10.1007/s00158-003-0368-6
6. Podinovskii V.V., Nogin V.O. *Pareto-optimal'nye resheniia mnogokriterial'nykh zadach* [Pareto-optimal solutions of multicriteria problems . Moscow, Fizmatlit, 2007. 256 p.
7. Karpenko A.P. *Approksimatsiia funktsii predpochtenii litsa, prinimaiushchego resheniia, v zadache mnogokriterial'noi optimizatsii. 3. Metody na osnove neironnykh setei i nechetkoi logiki* [Approximation of functions of the preferences of the decision maker in multicriteria optimization problem. 3. Methods based on neural networks and fuzzy logic]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2008, no. 4. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/86335.html> , accessed 22.03.2013.
8. Kolesnikov A.A. *Posledovatel'naia optimizatsiia nelineinykh agregirovannykh sistem upravleniia* [Sequential optimization of nonlinear aggregated control systems]. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 160 p.
9. Popov D.N. *Mekhanika gidro- i pnevmoprivodov* [Mechanics of hydraulic and pneumatic drives]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2002. 320 p.
10. 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 drive]. Moscow, Mashinostroenie, 1988. 312 p.
11. Popov D.N., Ermakov S.A., Loboda I.N., et al. *Inzhenernye issledovaniia gidroprivodov letatel'nykh apparatov* [Engineering studies of aircraft hydraulic drives]. Moscow, Mashinostroenie, 1978. 142 p.
12. Fomichev V.M. *Raschet kharakteristik elektrogidravlicheskikh usilitelei moshchnosti s uchetom temperatury zhidkosti* [Calculation of the characteristics of electro-hydraulic power amplifiers taking into account temperature of the fluid]. *Vestnik mashinostroeniia*, 1973, no. 10, pp. 31-34.
13. Popov D.N. *Otsenka effektivnosti i optimal'noe proektirovanie gidroprivodov* [Evaluation of effectiveness and optimum designing of hydraulic drives]. *Vestnik mashinostroeniia*, 1986, no. 9, pp. 20-23.
14. Red'ko P.G. *Povyshenie bezotkaznosti i uluchshenie kharakteristik elektrogidravlicheskikh slediashchikh privodov* [Increasing faultlessness and improvement of characteristics of electro-hydraulic servo drives]. Moscow, Ianus-K; RC MSTU "Stankin" Publ., 2002. 232 p.
15. Sklianskii F.I., Shumilov I.S., Goniiodskii V.I. *Privod rulevykh poverkhnostei samoletov* [Drive of steering surfaces of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie, 1974. 320 p.
16. Syritsyn T.A. *Nadezhnost' gidro- i pnevmoprivoda* [Reliability of hydraulic and pneumatic drive]. Moscow, Mashinostroenie, 1981. 216 p.

17. Statnikov R.B., Sobol' I.M. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriiami* [Choice of the optimum parameters in problems with many criteria]. Moscow, Drofa, 2006. 175 p.
18. Korkodinov D.V, Popov D.N. Optimal'noe proektirvoanie slediashchego elektrogidravlicheskiego privoda s drossel'nym regulirovaniem [Optimal designing of electro-hydraulic servo with throttle regulation]. *Gidravlicheskie mashiny, gidroprivody i gidropnevmoavtomatika: trudy Vserossiiskoi nauch.-tekhn. konf. studentov i aspirantov* [Hydraulic machines, hydraulic drives and hydro-pneumo-automatics: proc. of the all-Russian scientific-technical conf. of the students and post-graduate students]. Moscow, 9 December, 2010, Moscow, MEI Publ., 2010, pp. 124-128.
19. Andersson J., Krus P., Wallace D. Multi-objective optimization of hydraulic actuation systems. *Proceedings of the ASME DT Conferences, DETC/DAC-14512*, Baltimore, MD, 2000.