

УДК 629.7.062.2+62.52

Постановка и решение задачи многокритериальной оптимизации автономного электрогидравлического слеящего привода с комбинированным регулированием

Ножнин О.С.^{1,*}, Попов Д.Н.¹

^{*}nozhnin13@gmail.com

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В статье рассмотрено применение многокритериальной оптимизации при проектировании автономного электрогидравлического слеящего привода с комбинированным регулированием. Целью работы было получить близкое к оптимальному проектное решение привода для адекватной оценки его качеств и возможности сравнения с существующими аналогами. При проведении оптимизации методом ЛП-поиска описаны все этапы решения: выбор варьируемых параметров, определение ограничений на решения, выбор критериев качества системы. В процессе оптимизации был получен фронт Парето в трех координатах, после чего было выбрано оптимальное решение.

Ключевые слова: электрогидростатический привод, комбинированное регулирование, многокритериальная оптимизация

Введение

В последние годы инженерами авиационной промышленности все больше проявляется интерес к созданию полностью электрического самолёта. Считается, что это позволит снизить сложность и массу, повысить надежность и, в конечном счете, увеличить экономическую эффективность использования летательных аппаратов гражданского и военного назначения [1, 2]. Однако, несмотря на прогресс в области развития электротехнического и электронного оборудования, подавляющее большинство рулевых приводов современных летательных аппаратов используют для работы гидравлическую энергию. Это объясняется наличием у гидравлических приводов ряда специфических положительных качеств.

В конце прошлого века стала развиваться концепция «более электрического» самолета [2]. Этот термин соответствует летательным аппаратам, в которых часть энергии, подводится к исполнительным механизмам по проводам от централизованной электрической системы самолета, но для управления аэродинамическими поверхностями используются гидроприводы. В последнее время наблюдается постепенный переход к автономным гидравлическим приводам (АГП), использующим для работы электрическую энергию и включающим в свой состав насосную станцию.

Существует ряд схемных решений АГП, выбор которых продиктован конкретными требованиями тактико-технического задания. Наиболее перспективным для авиации проектным решением АГП считается электрогидростатический привод, принципиальная схема которого представлена на рис. 1. Насос и гидроцилиндр такого привода связаны замкнутым контуром. Скорость перемещения поршня полностью определяется величиной и направлением подачи насоса и, следовательно, скоростью вращения вала электродвигателя. Основными преимуществами электрогидростатического привода являются высокие значения КПД и очень малое потребление энергии в неподвижном и ненагруженном состояниях. В то же время такой привод имеет ряд недостатков, свойственных как в целом автономным приводам (низкая удельная мощность), так и конкретно этому схемному решению АГП (низкое качество отработки малых сигналов управления, ухудшенные по сравнению с дроссельными приводами жесткость и динамические качества привода, возможный перегрев контроллера электродвигателя [5]).

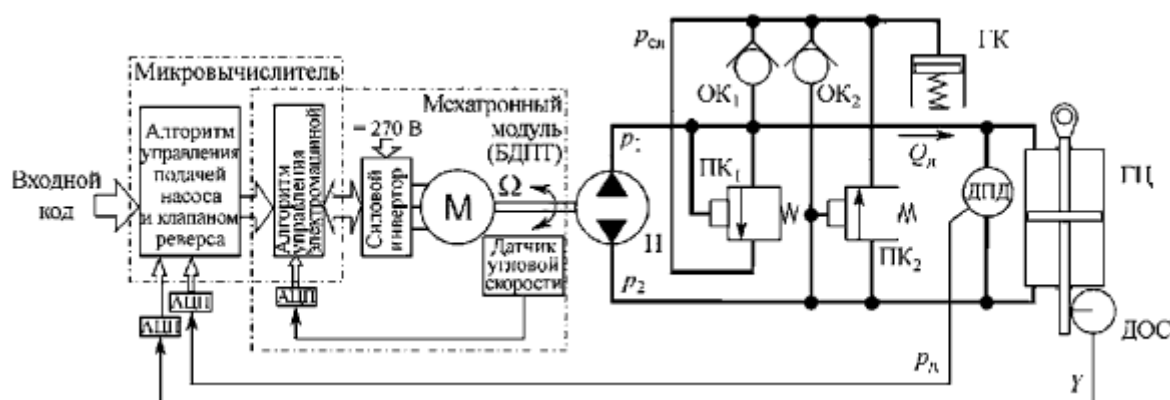


Рис. 1. Принципиальная схема электрогидростатического привода: АЦП – аналого-цифровые преобразователи; ГЦ – гидроцилиндр; ДОС – датчик обратной связи; ДПД – датчик перепада давления; ГК – гидрокомпенсатор; Н – насос; ОК₁, ОК₂ - обратные клапаны; ПК₁, ПК₂ – предохранительные клапаны [3]

Несмотря на известные случаи успешного внедрения электрогидростатических приводов в систему управления самолетом [2, 4], в целом их промышленное применение сильно ограничено.

Предъявление высоких требований к перспективным летательным аппаратам ставит перед конструкторами ряд проблем, требующих поиска новых подходов к построению

энергетических систем самолета. В последнее время в разных странах ведутся исследования [6, 7], направленные на поиск схемных решений АГП, которые частично или полностью устраняли бы указанные выше недостатки. Однако большинство предлагаемых проектных решений является лишь небольшой модификацией традиционного электрогидростатического привода. В связи с этим многообещающей выглядит компоновка электрогидравлического привода с комбинированным регулированием [8], схема которого приведена на рис. 2.

Привод с комбинированным регулированием является развитием электрогидростатического привода и также содержит электронный блок микровычислителя, обеспечивающего работу бесколлекторного электродвигателя. Клапан реверса управляется микровычислителем с помощью линейного электродвигателя таким образом, что смещение золотника клапана пропорционально сигналу рассогласования привода.

При больших и средних сигналах рассогласования привода микровычислитель задает скорость вращения электродвигателя пропорционально абсолютной величине рассогласования. В результате при значительных открытиях рабочих окон клапана реверса абсолютная величина скорости выходного звена привода регулируется преимущественно подачей насоса, которая, в свою очередь, управляется скоростью вращения вала электродвигателя. Насос такого привода работает в нереверсивном режиме, а изменение направления движения исполнительного механизма осуществляется перекладкой клапана реверса [3].

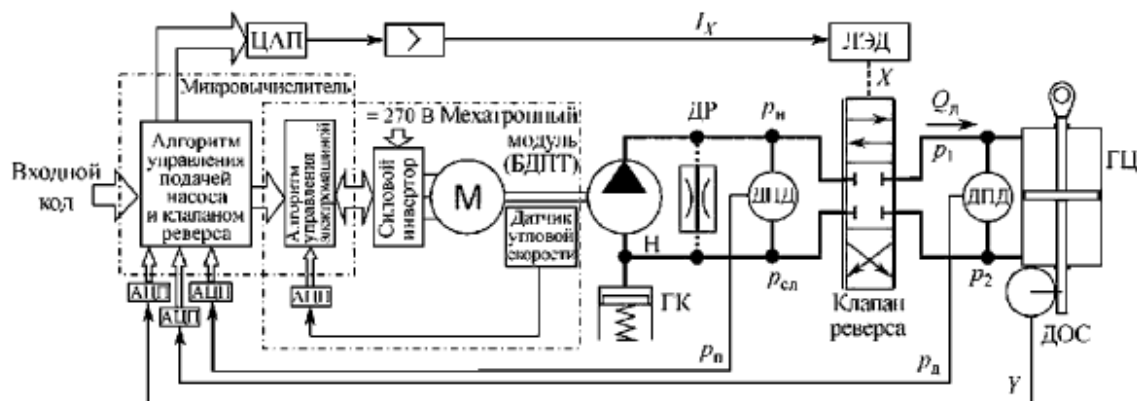


Рис. 2. Принципиальная схема ЭГСП с комбинированным регулированием скорости выходного звена:

АЦП – аналого-цифровые преобразователи; ГЦ – гидроцилиндр; ДОС – датчик обратной связи; ДПД – датчик перепада давления; ГК – гидрокомпенсатор; ЛЭД – линейный электродвигатель; Н – насос; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь [3]

Таким образом, регулирование скорости выходного звена привода с комбинированным регулированием происходит с использованием как дроссельного, так и объемного (электромоторного) регулирования. Отработка средних и больших сигналов рассогласования происходит с минимальными потерями мощности, что соответствует потерям при объемном регулировании. При малых сигналах рассогласования, когда потребляемая приводом мощность мала и энергетические показатели не столь важны, привод переходит на

режим дроссельного регулирования, обеспечивающий высокие показатели чувствительности и минимальные ошибки воспроизведения заданного движения.

Несмотря на ряд работ, посвященных исследованию привода с комбинированным регулированием [9-11], на настоящее время еще не решена проблема выбора оптимальных проектных решений при его разработке. Это ограничивает возможность достижения близких к оптимальным результатов при исследовании опытных образцов АГП, что, в свою очередь, не позволяет адекватно оценить преимущества и недостатки этого проектного решения по сравнению с уже существующими. Сложность указанной проблемы состоит в необходимости учета противоречащих друг другу требований, обеспечивающих оптимальную работу всей технической системы. В данной статье рассматривается использование метода многокритериальной оптимизации (МКО) для проектирования АГП с комбинированным регулированием.

1. Постановка задачи оптимального проектирования

Очевидно, что привод с комбинированным регулированием, как и любая техническая система, может быть представлен большим числом проектных решений. От выбора варианта такой системы будет зависеть эффективность самого привода, а также показатели тех машин, для управления которыми он предназначен.

В общем виде задача оптимального проектирования технической системы сводится к выбору таких входных параметров объекта проектирования, при которых достигается наилучшие значения критерия оптимальности, сформированного на основе выходных параметров объекта проектирования. Для получения наилучшего проектного решения обычно принимают несколько критериев, характеризующих эффективность системы. Таким образом, задача оптимизации становится многокритериальной. Алгоритм решения задачи МКО представлен на рис. 3.



Рис. 3. Алгоритм решения задачи МКО

1.1. Составление математической модели

Наличие адекватной математической модели привода является необходимым условием проведения любой оптимизации. Моделирование привода с комбинированным регулированием осуществлялось в среде Simulink программного пакета Matlab [12].

Разработанная модель характеризуется следующими особенностями:

- учтено влияние микрогеометрии в распределителе;
- учитывается влияние на модуль упругости жидкости давления, температуры и газосодержания;
- трение в уплотнениях гидроцилиндра принимается равным сумме силы Штрибека, кулоновской силы и силы вязкого трения;
- учтена неравномерность подачи насоса;
- учтены основные нелинейности в элементах гидропривода, вызванные насыщением по перемещению золотника в клапане реверса, насыщением по току в обмотках электродвигателя и т.д.).

Отметим, что эта математическая модель разработана на основе существующей модели, адекватно описывающей работу реального привода с комбинированным регулированием [13]. Структурная схема модели в блочном виде представлена на рис. 4.

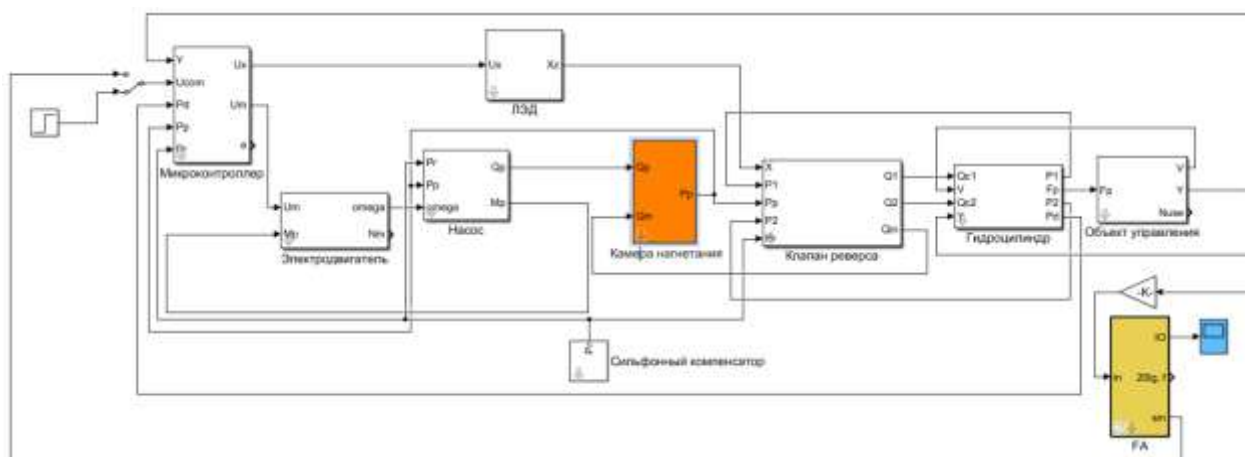


Рис. 4. Структурная модель привода с комбинированным регулированием

1.2. Определение вектора варьируемых параметров

Варьируемые параметры – это такие параметры, за счет изменения которых достигается оптимальное проектное решение технической системы. В качестве таких параметров были приняты следующие величины:

- 1) коэффициент передачи основного контура K_x ;
- 2) коэффициент усиления сигнала в канале клапана реверса K_0 ;
- 3) коэффициент обратной связи по перепаду давления K_{osp} (целесообразность введения обратной связи по перепаду давления на распределителе указывается в работе [13]);
- 4) диаметр золотника распределителя d_z ;
- 5) поддерживаемый перепад давления на золотнике P_d .

1.3. Определение вектора критериев

Число критериев (показателей качества), по которым оценивается эффективность проектного варианта, должно быть по возможности ограничено. К основным показателям качества гидроприводов и их источников питания относятся показатели надёжности, показатели статических и динамических характеристик, а также энергетические, массогабаритные и экономические показатели [14]. Отметим, что в процессе многокритериальной оптимизации для её упрощения, а также для удобства визуального наблюдения решений (границы Парето) было принято решение сократить число критериев оптимальности до трёх, наиболее полно отражающих цели проектирования.

В качестве критериев оптимальности гидропривода с комбинированным регулированием приняты величины, обоснование выбора которых представлено ниже.

Максимальный КПД гидравлической части привода η при подаче на вход максимального ступенчатого сигнала. Этот критерий является показателем качества энергетической эффективности и характеризует работу объемного режима регулирования.

Значение ИТАЕ (интеграл от произведения модуля ошибки на время) при подаче на вход ступенчатого сигнала малой амплитуды (1% от максимальной). ИТАЕ является показателем качества переходного процесса и, таким образом, характеризует режим дроссельного регулирования привода.

Энергопотребление при отсутствии сигнала управления на входе привода N_{neut} . Рулевые поверхности самолета, управляемые АГП, большую часть полета находятся в неподвижном состоянии либо осуществляют движение с очень малыми амплитудами. Поэтому крайне важным показателем качества привода является энергопотребление привода в «нейтрали». Кроме того, уменьшение этих потерь снижает проблему возможного перегрева системы, актуальную для многих АГП [5].

Приведенные критерии, по мнению авторов, наиболее полно характеризуют качество всего привода. Отметим также, что для АГП, устанавливаемых на летательные аппараты, крайне важны габаритные, массовые показатели, а также показатели надежности. Однако последние показатели определяются во многом технологией производства и выбором материалов и не рассматриваются в данной работе. Более того, учет массогабаритных критериев качества имеет смысл только при наличии конкретных требований технического задания.

1.4. Определение ограничений

Для проведения оптимизации необходимо указать возможные пределы изменения выбранных параметров, которые называют параметрическими ограничениями. Ограничения выделяют в пространстве параметров многомерный параллелепипед.

Диапазон изменения выбранных параметров приведен ниже:

- 1) $3 \leq K_x \leq 12$;
- 2) $0,2 \leq K_0 \leq 1$;
- 3) $10^{-7} \leq K_{osp} \leq 10^5$;
- 4) $5 \text{ мм} \leq d_z \leq 15 \text{ мм}$;
- 5) $2,5 \text{ МПа} \leq P_d \leq 7,5 \text{ МПа}$.

Также были выделены следующие ограничения, накладываемые на решения:

- 1) При подаче на вход синусоидального сигнала с амплитудой, равной 0,5% от максимальной, фазовое искажение не должно превышать 15° на частоте 1 Гц в условиях частичного нагружения привода.
- 2) Амплитудное искажение при тех же условиях не должно превышать 1,5 Дб.

Эти ограничения продиктованы требованиями, предъявляемыми к современной перспективной авиации.

1.5. Выбор метода оптимизации

В настоящее время задача МКО относится к актуальным проблемам. Разработано множество алгоритмов, в той или иной степени применяющихся для оптимизации современных технических систем. В последнее время набирает популярность метод ЛП-поиска, основанный на переборе значений исследуемого пространства параметров [17]. Несмотря на не самую высокую эффективность, данный метод отличается простотой и успешно используется для решения задач МКО технических систем [15,16]. Для повышения эффективности оптимизации применяют более развитые методы, основанные, в частности, на генетических алгоритмах [16]. Также набирают популярность алгоритмы поисковой оптимизации, которые называют поведенческими, интеллектуальными, метаэвристическими, вдохновленными природой, роевыми, популяционными и т.д. Эффективность таких алгоритмов часто превосходит эффективность классических алгоритмов [18].

Ввиду относительной простоты, обусловленной малой размерностью векторов параметров и критериев, для решения данной задачи использовался метод ЛП-поиска.

2. Решение задачи МКО

В параллелепипеде пространства параметров было выбрано 128 точек. После проведения оптимизации был построен фронт Парето, а также выбраны наиболее эффективные точки. Отметим, что для удобства расчетов и возможности визуализации результатов было условлено при оптимизации минимизировать значение, обратное КПД. Все расчеты проводились в условиях постоянной нагрузки на исполнительный механизм, равной 40 % от максимальной.

Трехмерное изображение границы Парето, а также ее проекции на основные плоскости представлены на рис. 5.

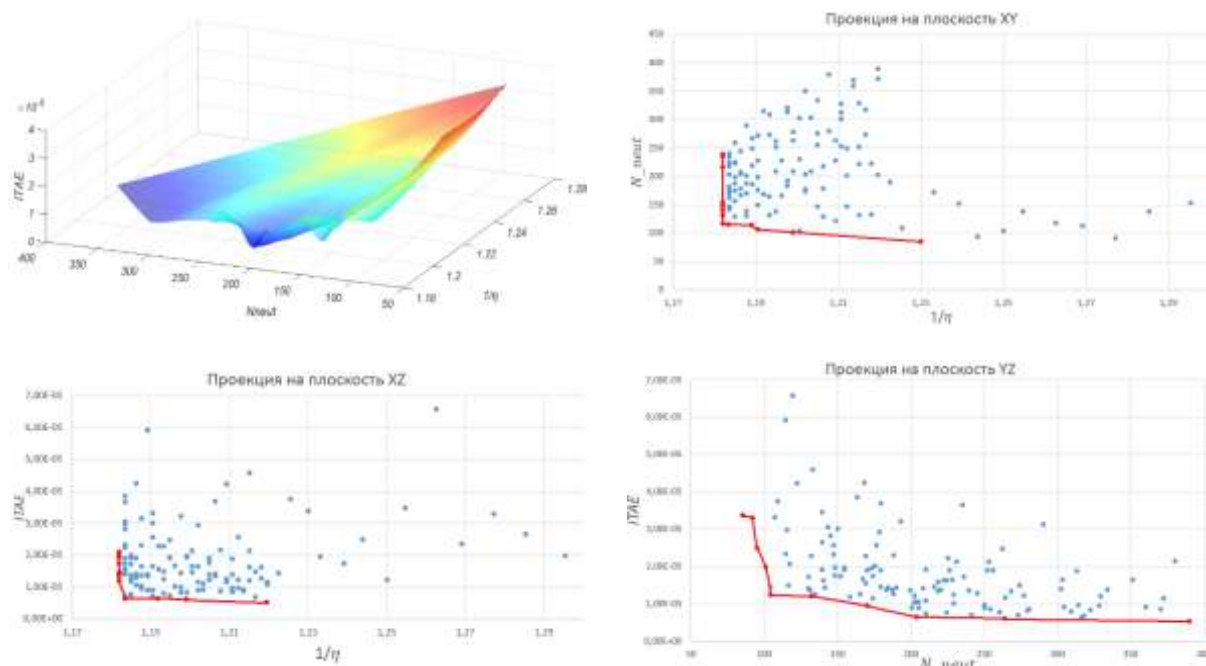


Рис. 5. Изображение границы Парето

Для исследования взаимозависимости критериев были посчитаны коэффициенты корреляции (табл. 1).

Таблица 1

	N_{neut}	$ITAE$
$1/\eta$	-0,138	0,191
N_{neut}	—	-0,483

Значения коэффициентов корреляции доказывает взаимную независимость критериев и, таким образом, обосновывает правильность выбора именно этих показателей качества привода.

После анализа результатов оптимизации было принято решение скорректировать параметрические ограничения, отбросив таким образом заведомо неэффективные решения. Более того, было решено отказаться от одного из параметров (K_{osp}) вследствие крайне малой зависимости от него показателей качества привода. Значение этого параметра может быть выбрано исходя из требований к времени установки требуемого перепада давлений на золотнике распределителя.

Скорректированные границы изменения параметров представлены ниже:

- 1) $7 \leq K_x \leq 12$;
- 2) $0,15 \leq K_0 \leq 0,55$;
- 3) $6 \text{ мм} \leq d_z \leq 11 \text{ мм}$;
- 4) $2,5 \text{ МПа} \leq P_d \leq 5 \text{ МПа}$.

Для 2-го этапа оптимизации количество пробных точек было уменьшено до 64. Результаты оптимизации представлены на рис. 6.

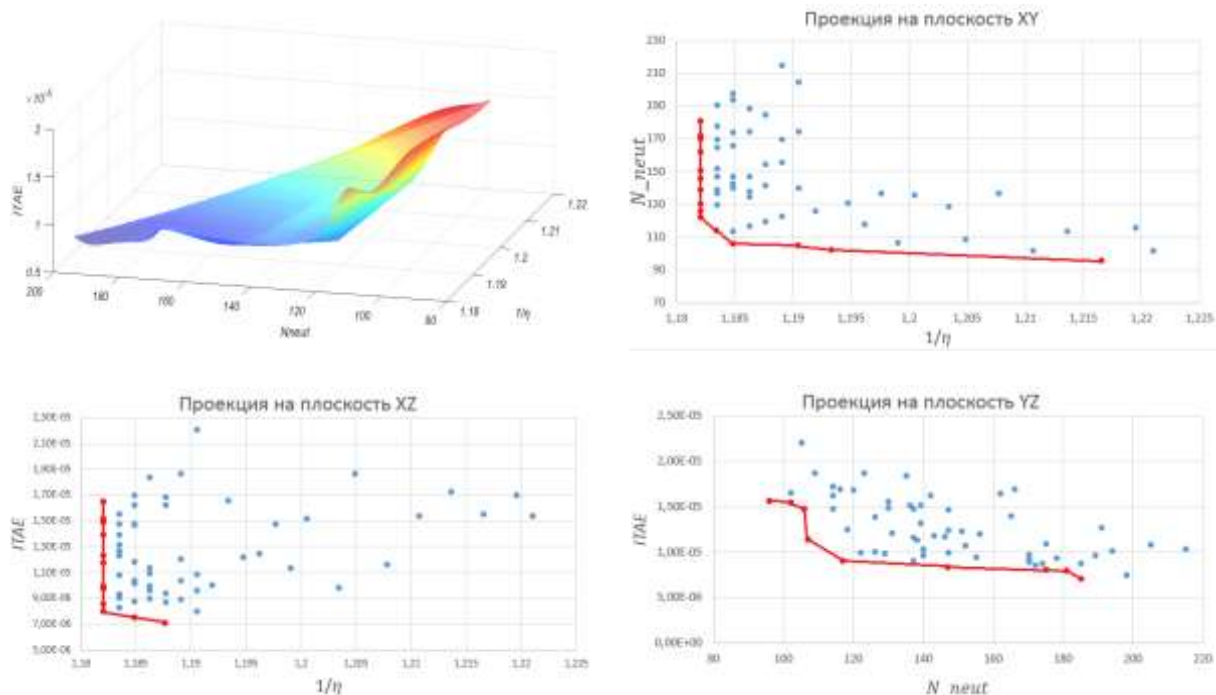


Рис. 6. Изображение границы Парето для 2-го этапа оптимизации

После 2-х этапов оптимизации были выбраны две наиболее эффективные точки A_{42}^{**} и A_{49}^{**} . Согласно рекомендациям [17] была сделана попытка улучшить решение за счет проведения ЛП-поиска в параллелепипеде, границы которого отличаются от координат параметров выбранных точек на $\pm 5\%$. После проведения 32 испытаний удалось улучшить выбранные точки.

Значения критериев после каждого этапа оптимизации для наиболее оптимальных по мнению авторов решений представлены в табл. 2. Количество звездочек над выбранными точками означает этап оптимизации привода.

Таблица 2

Номер точки	η , %	N_{neut} , Вт	$ITAE \cdot 10^6$
A_{70}^*	84,6	132	12,00
A_{42}^{**}	84,3	117	9,04
A_{49}^{**}	84,6	122	9,99
A_{14}^{***}	84,5	115	9,30

Таким образом, в качестве наиболее оптимальной принята точка A_{14}^{***} , вектор параметров которой представлен в табл. 3.

Таблица 3

Номер точки	Значение параметра				
	K_x	K_0	K_{osp}	d_z , мм	P_d , МПа
A_{14}^{***}	11,6	0,15	$5 \cdot 10^{-6}$	8	2,8

Заключение

При проведении МКО автономного электрогидравлического следящего привода методом ЛП-поиска был получен ряд точек, лежащих на фронте Парето, после чего было выбрано оптимальное по мнению авторов сочетание параметров. Оптимизация проводилась в три этапа, каждый последующий из которых характеризовался сужением границ исследуемого пространства параметров по сравнению с предыдущим. В результате было получено решение, которое обеспечивает компромисс между электромоторным и дроссельным режимами регулирования. Таким образом, привод с комбинированным регулированием обладает высокими энергетическими характеристиками и, кроме того, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современным летательным аппаратам по части динамических характеристик.

Важно отметить, что четыре из пяти выбранных варьируемых параметров могут быть настроены программно в блоке управления приводом, не изменяя таким образом конструкцию всей системы. Следовательно, привод с комбинированным регулированием имеет потенциал для оптимизации под достаточно широкий диапазон технических требований конкретного заказчика.

Научная новизна представленной работы заключается в использовании многокритериальной оптимизации для синтеза параметров привода с комбинированным регулированием, а также выбор оптимального проектного решения на основе исследования трехмерного фронта Парето.

Список литературы

1. Селиванов А.М., Алексеенков А.С., Найденов А.В. Перспективы развития автономных электрогидравлических приводов // Известия Тульского гос. ун-та. Техн. науки. 2011. № 5-1. С. 359-364.
2. Adams C. A380: More electric aircraft // Avionics Magazine. 2001. October 1. Режим доступа: <http://www.aviationtoday.com/2001/10/01/a380-more-electric-aircraft/> (дата обращения 19.03.2017).
3. Машиностроение: энциклопедия: В 40 т. Раздел IV: Расчет и конструирование машин. Т. IV-2: Электропривод. Гидро- и виброприводы. Кн. 2: Гидро- и виброприводы / Д.Н. Попов, В.К. Асташев, А.Н. Густомясов и др.; под общ. ред. В.К. Асташева, Д.Н. Попова. М.: Машиностроение, 2012. 303 с.
4. Navarro R. Performance of an electro-hydrostatic actuator on the F-18 systems research aircraft. Edwards, CA, USA: NASA, 1997. 33 p.
5. Шумилов И.С. Рулевые приводы с автономным гидропитанием (АРП) для магистральных самолётов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 8. С. 139-161. DOI: [10.7463/0814.0724446](https://doi.org/10.7463/0814.0724446)

6. Kang Rongjie, Jiao Zongxia, Wang Shaoping, Chen Lisha. Design and simulation of electro-hydrostatic actuator with a built-in power regulator // Chinese J. of Aeronautics. 2009. Vol. 22. Iss. 6. Pp. 700-706. DOI: [10.1016/S1000-9361\(08\)60161-2](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(08)60161-2)
7. McCullough K.R. Design and characterization of a dual electro-hydrostatic actuator: doct. diss. Hamilton, Ontario: McMaster Univ. Publ., 2011. 193 p.
8. Селиванов А.М. Принцип комбинированного регулирования скорости выходного звена гидравлического привода и его современная реализация // Вестник Московского авиационного ин-та. 2011. Т. 18. № 3. С. 147-151.
9. Хомутов В.С. Улучшение статических и динамических характеристик электрогидростатического привода в области малых сигналов управления: дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 178 с.
10. Алексеенков А.С. Исследование характеристик и рабочих процессов автономного электрогидравлического рулевого привода с комбинированным регулированием скорости // Современные проблемы науки и образования. Электрон. журн. 2014. № 2. С. 122. Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12896> (дата обращения 19.03.2017).
11. Селиванов А.М., Алексеенков А.С., Найденов А.В. Оценка области дроссельного регулирования в приводе с комбинированным регулированием скорости выходного звена // Известия Тульского гос. ун-та. Техн. науки. 2011. № 5-1. С. 299-303.
12. Ножнин О.С. Комбинированное регулирование электрогидравлического следящего привода // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 5. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/839489.html> (дата обращения 19.03.2017).
13. Алексеенков А.С. Улучшение динамических свойств и исследование рабочих процессов авиационного рулевого гидропривода с комбинированным регулированием скорости при увеличении внешней нагрузки: дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 150 с.
14. Попов Д.Н. Оценка эффективности и оптимальное проектирование гидроприводов // Вестник машиностроения. 1986. № 9. С. 20-23.
15. Боровин Г.К., Попов Д.Н. Многокритериальная оптимизация гидросистем: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 94 с.
16. Замараев Д.С., Попов Д.Н. Оптимизация электрогидравлического усилителя для следящего привода с дроссельным регулированием // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 12. С. 105-124. С. 105-123 DOI: [10.7463/1213.0637872](https://doi.org/10.7463/1213.0637872)
17. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. 2-е изд. М.: Дрофа, 2006. 175 с.
18. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленный природой. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 446 с.

The Formulation and Solution of the Multi-objective Optimization Problem for an Autonomous Electrohydraulic Servo Actuator with Combined Control

O.S. Nozhnin^{1,*}, D.N. Popov¹

[*nozhnin13@gmail.com](mailto:nozhnin13@gmail.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: electrohydrostatic actuator, combined control, multi-objective optimization

The rapid development of electrical engineering industries for aviation has resulted in a gradual transition to the autonomous electrohydraulic drives, among which an electro-hydrostatic drive is currently considered to be the most advanced. However, high requirements for dynamic parameters of modern unstable and low-stability aircrafts put restriction on implementation of electro-hydrostatic drives in the industry.

A combined control hydraulic drive arisen from the electro-hydrostatic drive development solves the problem of low dynamic parameters. High dynamics for combined control is achieved through the use of double (throttle and electric power) control with each of them being predominant depending on the input signal value.

Due to small knowledge of the drive with combined control, the article proposes to use a multi-criterion optimization method in order to obtain optimal results in its development. This will allows an adequate estimate of drive performance for its comparison with analogues and a justification of the feasibility of further research as well.

The article describes all the stages of multi-criteria optimization of the combined control drive using the LP-search method. Optimization is carried out taking into account the requirements for modern aircrafts. As criteria, were taken three values, which, in the authors' opinion, provide the most complete description of the entire drive quality (a drive power consumption in the "neutral", an efficiency of the hydraulic part of the drive in the mode of electric power control, a value of ITAE when driving with a small signal). As a result of optimization, the Pareto front was obtained in three coordinates, corresponding to effective solutions, after which a compromise between the criteria was found, and the optimal solution was chosen.

The design solution of the combined control drive, obtained after optimization, meets all the requirements for modern aircrafts and has both the high power performance and the high dynamics. Nevertheless, this study should be considered incomplete because of not taking into account a number of parameters, including weight-size and drive reliability ones.

References

1. Selivanov A.M., Alekseenkov A.S., Naydenov A.V. Prospects of autonomous electrohydraulic drive. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State Univ. Engineering Science], 2011, no. 5-1, pp. 359-364 (in Russian).
2. Adams C. A380: More electric aircraft. *Avionics Magazine*, 2001, October 1. Available at: <http://www.aviationtoday.com/2001/10/01/a380-more-electric-aircraft/>, accessed 19.03.2017.
3. *Mashinostroenie: entsiklopediia. V 40 t. Razdel IV: Raschet i konstruirovanie mashin. T. IV-2: Elektroprivod. Gidro- i vibroprivody. Kn. 2: Gidro- i vibroprivody* [Mechanical engineering: Encyclopedia. In 40 vols. Pt. IV: Calculation and design of machines Vol. 4-2: Electric drive. Hydraulic and vibro drives. Book 2: Hydraulic and vibro drives / D.N. Popov, V.K. Astashev, A.N. Gustomiasov a.o.; ed. by D.N. Popov, V.K. Astashev]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2012. 303 p. (in Russian).
4. Navarro R. Performance of an electro-hydrostatic actuator on the F-18 systems research aircraft. Edwards, CA, USA: NASA, 1997. 33 p.
5. Shumilov I.S. Hydraulic actuators with autonomous hydraulic supply for the mainline aircrafts. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2014, no. 8, pp. 139-161. DOI: [10.7463/0814.0724446](https://doi.org/10.7463/0814.0724446) (in Russian)
6. Kang Rongie, Jiao Zongxia, Wang Shaoping, Chen Lisha. Design and simulation of electro-hydrostatic actuator with a built-in power regulator. *Chinese J. of Aeronautics*, 2009, vol. 22, no. 6, pp. 700-706. DOI: [10.1016/S1000-9361\(08\)60161-2](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(08)60161-2)
7. McCullough K.R. Design and characterization of a dual electro-hydrostatic actuator: doct. diss. Hamilton, Ontario: McMaster Univ. Publ., 2011. 193 p.
8. Selivanov A.M. The principle of combined speed control output unit hydraulic drive and its modern implementation. *Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta* [Herald of the Moscow Aviation Institute], 2011, vol. 18, no. 3, pp. 147-151 (in Russian).
9. Khomutov V.S. *Uluchshenie staticheskikh i dinamicheskikh kharakteristik elektrogidrostaticheskogo privoda v oblasti malykh signalov upravleniia. Kand diss.* [Improvement of static and dynamic characteristics of an electrohydrostatic actuator in the field of small control signals. Cand. diss.]. Moscow, 2008. 178 p. (in Russian).
10. Alekseenkov A.S. Research of characteristics and working processes of autonomous electrohydraulic actuator with combined speed control. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia* [Modern Problems of Science and Education], 2014, no. 2, p. 122. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12896>, accessed 19.03.2017 (in Russian).
11. Selivanov A.M., Alekseenkov A.S., Naydenov A.V. Evaluation field of throttle control in the drive with combined control of output link. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State Univ. Engineering Science], 2011, no. 5-1, pp. 299-303 (in Russian).

12. Nozhnin O.S. Combined regulation electro-hydraulic actuator. *Molodezhnyj nauchno-tekhnicheskij vestnik. MGTU im. N.E. Baumana* [Youth Scientific and Technical Bulletin of the Bauman MSTU], 2016, no. 5. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/839489.html>, accessed 19.03.2017 (in Russian).
13. Alekseenkov A.S. *Uluchshenie dinamicheskikh svojstv i issledovanie rabochikh protsessov aviatsionnogo rulevogo gidroprivoda s kombinirovannym regulirovaniem skorosti pri uvelichenii vneshnei nagruzki. Kand diss.* [Improvement of dynamic and static characteristics and research of working processes of the aircraft hydraulic steering actuator with combined speed control with increasing external load. Cand. diss.]. Moscow, 2014. 150 p. (in Russian).
14. Popov D.N. Efficiency evaluation and optimal designing of hydraulic drives. *Vestnik mashinostroeniia* [J. of Mechanical Engineering], 1986, no. 9, pp. 20-23 (in Russian).
15. Borovin G.K., Popov D.N. *Mnogokriterial'naia optimizatsiia gidrosistem* [Multi-criteria optimization of hydraulic systems]: a textbook. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2007. 94 p. (in Russian).
16. Zamaraev D.S., Popov D.N. Optimization of an electrohydraulic actuator for a servo drive with throttle control. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2013, no. 12, pp. 105-123. DOI: [10.7463/1213.0637872](https://doi.org/10.7463/1213.0637872) (in Russian)
17. Sobol' I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriiami* [Choice of the optimal parameters in problems with many criteria]. 2nd ed. Moscow: Drofa Publ., 2006. 175 p. (in Russian).
18. Karpenko A.P. *Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizatsii. Algoritmy vdokhnovlennye prirodoj* [Modern methods of search optimization]. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2014. 446 p. (in Russian).