

УДК 629.735

Е. А. КОНОНЫХИН¹, С. В. ЕПИФАНОВ²¹ ПАО ФЭД, Харьков, Украина² Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

ДОВОДКА ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОУЗЛОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Обсуждаются основные тенденции использования устройств исполнительных механизмов авиационных двигателей, преобразующих электрические команды в механические и гидравлические. Выполнено сравнение характеристик электрогидравлических усилителей ПС7-5 и ПМ15-500, получивших наибольшее распространение в отечественном авиастроении. Обоснована актуальность использования струйных предварительных каскадов усиления электрогидравлических усилителей. Описана структура поузловой динамической универсальной модели электрогидравлических усилителей. Приведен пример использования математической модели при доводке параметров на этапе доводочных испытаний электрогидравлических усилителей.

Ключевые слова: электрогидравлический усилитель, сопло-заслонка, дефлектор, поузловая динамическая модель.

Введение

Основными функциями системы автоматического управления авиационных двигателей (САУ АД) является управление подачей топлива в камеру сгорания и механизацией проточной части для обеспечения заданных режимов работы двигателя. В распространенных электронных системах управления авиационными двигателями типа FADEC (Full Authority Digital Electronic Control) электронный блок управления двигателем формирует электрические сигналы, которые поступают в электрогидравлические преобразователи и преобразуются в гидравлические команды; последние поступают в исполнительные механизмы и преобразуются в механические команды управления механизацией двигателя или гидравлические команды управления расходом топлива. Электромеханические исполнительные механизмы, преобразующие электрические команды непосредственно в механические выходные параметры, в настоящее время получили меньшее распространение вследствие меньшей стойкости к внешним воздействующим факторам и сложности резервирования данного вида исполнительных устройств. Поэтому основным устройством, преобразующим электрические сигналы в пропорциональные им гидравлические команды для гидромеханической части, являются электрогидравлические усилители (ЭГУ).

Можно выделить два типа ЭГУ: однокаскадные (с прямым приводом от электромагнитов элемента, управляющего потоком жидкости) и многокаскадные. Первые ЭГУ, разработанные в 50-х годах, име-

ли в предварительном каскаде усиления золотниковый распределитель. В них использовался входной сигнал значительной мощности (порядка нескольких ватт) с осцилляцией для устранения «залипания» золотника. Использование в последующие годы (с 70-х годов) в предварительном каскаде усиления дросселя типа «сопло-заслонка» позволило существенно уменьшить мощность входного сигнала (до десятых и сотых долей ватта) и исключить осцилляцию.

В современный период наблюдается тенденция возврата к использованию золотниковых распределителей с прямым приводом от электромагнитов (Direct Drive Valves - DDV). Это, в первую очередь, связано с бурным развитием электроники и элементной базы, которая позволяет создавать компактные мощные электрические усилители, а высокое быстродействие электроники позволяет компенсировать за счет более сложных законов управления главный недостаток данных гидроусилителей – зону нечувствительности. В авиации DDV используются для управления тандемными приводами современных многоцелевых истребителей; в [1] рассмотрены особенности управления дозирующей иглой, выполненной в виде DDV.

Малая удельная мощность и конструктивные особенности электромагнитных преобразователей (которые зачастую обладают малым ходом выходного звена) привели к относительно малой распространенности DDV в системах управления авиационными двигателями. Поэтому эти ЭГУ в данной статье не рассматриваются.

В настоящее время в САУ авиационных двига-

телей наибольшее распространение получили двухкаскадные ЭГУ типа сопло-заслонка и, обладающие большей гряззостойкостью, усилители со струйной трубкой и дефлектором. Уровень предъявляемых к ним требований постоянно растет. Это приводит к необходимости многофакторного анализа параметров на стадии проектирования, что невозможно без использования математических моделей.

1. Сравнение схем ЭГУ

В САУ авиационных двигателей на постсоветском пространстве наибольшее распространение получили ЭГУ ПС7-5 (однокаскадный типа сопло-заслонка) и ПМ15-500 (двухкаскадный с соплом-заслонкой в предварительном каскаде усиления и золотником в выходном каскаде). ЭГУ ПС7-5 также зачастую используется для управления подпружиненным золотником, который, в свою очередь, управляет большими расходами жидкости, образуя двухкаскадный усилитель.

1.1. Однокаскадный ЭГУ типа сопло-заслонка ПС7-5

Исполнительный механизм, изображённый на рис. 1, состоит из дифференциального сервопоршня, со стороны с меньшей площадью которого подводится постоянное давление, а с большей - переменное (командное), сформированное в делителе, давление. Делитель давления выполнен в виде питающего дросселя постоянного сечения и сливного сопла, прикрываемого заслонкой. Данная схема до недавнего времени была типичной для управления дозирующими элементами в диапазоне расходов 500-5000 кг/ч. Это обусловлено высокой надёжностью данной схемы вследствие малого количество элементов и отсутствия золотниковых пар. В данных схемах применяется хорошо отработанный промышленностью ЭГУ типа сопло-заслонка ПС7-5.

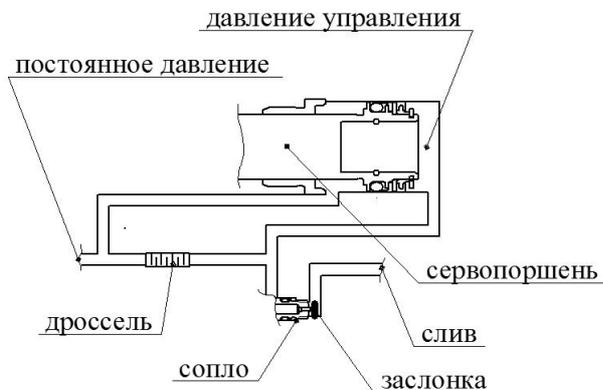


Рис. 1. Исполнительный механизм на базе ЭГУ ПС7-5

Однако в связи с тем, что для привода дозирующего элемента сервопоршень должен обладать достаточной площадью и ходом, а площадь питающего жиклера и сливного сопла ограничены характеристиками ЭГУ, практически все дозаторы, использующие данную схему привода дозирующего элемента, имеют малую скорость перемещения дозирующей иглы (время перемещения дозирующей иглы от упора минимального расхода топлива до упора максимального расхода топлива составляет 2-3 с). Вторым существенным недостатком данной системы является значительная зона нечувствительности скоростной характеристики по управляющему сигналу (рис. 2), вызванная трением на сервопоршне и пологой характеристикой по давлению делителя, состоящего из дросселя и сопла, прикрываемого заслонкой. Для оценки характеристик исполнительного механизма, изображенного на рис. 1, создана упрощенная модель, в которой зависимости, описывающие дросселирующие элементы, электромеханический преобразователь и элемент типа сопло-заслонка аналогичны описанным в [2, 3]. Расчетная зависимость скорости перемещения исполнительного механизма от управляющего сигнала и данные, полученные в результате эксперимента, приведены на рис. 2.

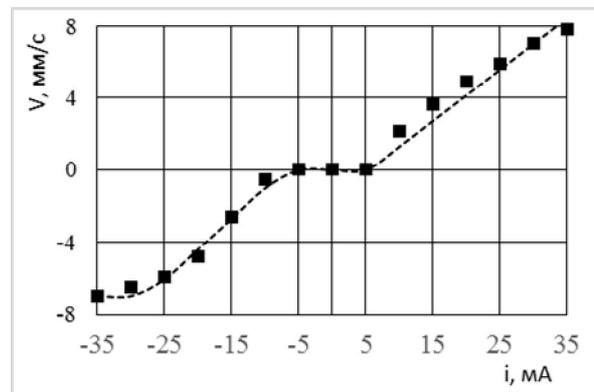


Рис. 2. Скоростная характеристика исполнительного механизма с ПС7-5 (линия – результаты моделирования; точки – экспериментальные данные)

Как видно из рис. 2, исполнительный механизм на базе ЭГУ ПС7-5 обладает значительной зоной нечувствительности и нелинейностью скоростной характеристики. Незначительное улучшение характеристик возможно за счет снижения сил трения на сервопоршне или использования второго каскада с подпружиненным золотником; однако это снижает надежность системы за счет появления дополнительного элемента.

1.2. Двухкаскадный ЭГУ типа сопло-заслонка

В связи с требованиями обеспечения высокого уровня характеристик (больших коэффициентов усиления по мощности, малых непроизводительных утечек, нелинейности, гистерезиса, смещения нуля, несимметричности и т.д.) в настоящее время наиболее часто применяются двухкаскадные ЭГУ. С расширением области применения, повышением уровня характеристик и увеличением мощности электрогидравлических следящих приводов с дроссельным регулированием непрерывно повышаются технические требования, предъявляемые к ЭГУ. Главной отрицательной особенностью современных ЭГУ является недостаточная стабильность характеристик, проявляющаяся при изменении внешних условий и приводящая к параметрическим отказам привода (выходу параметров за допустимые пределы). Наиболее опасными факторами, влияющими на надежную работу ЭГУ, являются значительные изменения температуры жидкости и интенсивные внешние механические вибрации [2].

Исследования показали, что некоторое повышение стабильности характеристик можно обеспечить улучшением конструкции и выбором рациональных режимов работы элементов ЭГУ. Существенное повышение стабильности характеристик дает применение в усилителях силовой механической обратной связи по положению золотника [2]. Скоростная характеристика исполнительного механизма с двухкаскадным усилителем типа сопло-заслонка ПМ15-500, полученная экспериментальным путем, показана на рис. 3.

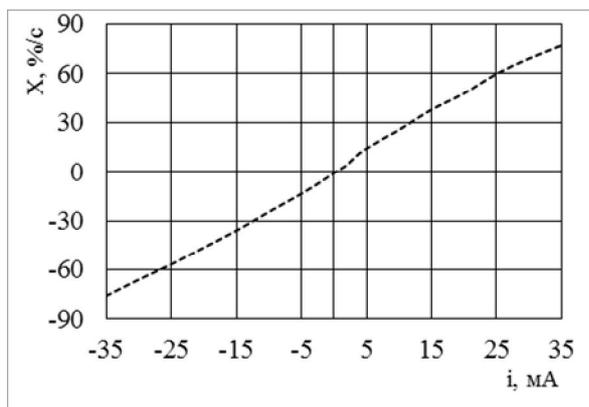


Рис. 3. Экспериментальная скоростная характеристика исполнительного механизма с ПМ15-500

Как показывает сравнение рис. 2 и 3, скоростные характеристики контура управления с ЭГУ ПМ15-500 значительно лучше, чем полученные на базе ПС7-5.

1.3. ЭГУ со струйным предварительным каскадом усиления

Как было отмечено ранее, начиная с 70-х годов и до настоящего времени наибольшее распространение получили гидроусилители типа сопло-заслонка. Применению в предварительном каскаде усиления струйной трубки или дефлектора длительное время препятствовало мнение о невозможности использования этого устройства при давлениях входа более 2,5 МПа из-за появления автоколебаний. В настоящее время проблема автоколебаний этих усилителей преодолена, а значительно более высокая грязестойкость и лучшие параметры предварительных каскадов на базе струйной трубки и дефлектора обусловили их применение в авиационной технике.

Предварительные каскады на базе струйной трубки обеспечивают более высокие коэффициенты усиления по давлению по сравнению с предварительными каскадами на основе дефлектора, благодаря меньшему расстоянию между соплом и приемными окнами (особенно для жидкостей, обладающих значительной вязкостью), а также меньшую склонность к автоколебаниям, благодаря отсутствию подвижного элемента, взаимодействующего со струей. Гидроусилители с дефлектором более технологичны и надежны по механическим отказам упругих элементов, чем гидроусилители с подвижной струйной трубкой.

1.4. Требования к математической модели, используемой на этапе разработки ЭГУ

Разработка и доводка параметров ЭГУ является сложной многопараметрической задачей. Подходы к оптимизации параметров ЭГУ, основанные на использовании линеаризованных характеристик большинства элементов [3], не позволяют в полной мере варьировать параметры в связи с ограниченностью областей рабочих условий, в которых эти модели имеют необходимую точность (так как действительные характеристики существенно нелинейны). В настоящее время проявляется тенденция к использованию в ЭГУ унифицированных конструкций струйных каскадов, совмещенных с магнитной системой; при этом необходимые характеристики достигаются за счет изменения конструкций золотникового распределителя. Формирование математических моделей на основе линеаризованных характеристик элементов ЭГУ не позволяет получить достоверные характеристики системы и ее элементов при создании научно технического задела по формированию облика магнитной системы и струйного каскада для вновь разрабатываемых ЭГУ. Для решения этих задач требуются модели, в максималь-

ной степени использующие в качестве исходных данных геометрические параметры элементов и свойства материалов с минимальным использованием для расчета характеристик элементов ЭГУ стандартных солверов, основанных на применении метода конечных элементов.

Далее приведена структура подобной модели и пример ее использования на этапе доводки параметров ЭГУ.

2. Математическая модель ЭГУ

В состав узлов динамической модели ЭГУ (рис. 4) входят математические модели его отдельных элементов:

- электромеханического преобразователя 1;
- предварительного каскада усиления 2;
- золотникового распределителя 3;
- механической системы с упругой обратной связью между каскадами, связывающей все вышеперечисленные элементы.

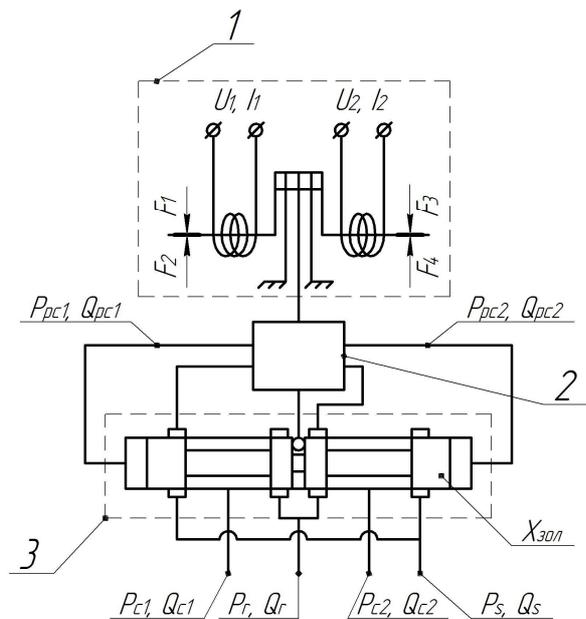


Рис. 4. Структурная схема математической модели ЭГУ: 1 – электромеханический преобразователь; 2 – предварительный каскад усиления; 3 – золотниковый распределитель

Входными параметрами математической модели являются напряжение на катушках U_1 и U_2 , давления к потребителю p_{c1} , p_{c2} , давление подачи p_s и давление слива p_r . В результате моделирования рассчитываются выходные параметры (ток в катушках I_1 и I_2 , расход к потребителю Q_{c1} , Q_{c2} , расход подачи Q_s и расход слива Q_r) и внутренние параметры (положение золотника $X_{зол}$, давление и расход,

формируемые предварительным каскадом P_{pc1} , P_{pc2} , Q_{pc1} , Q_{pc2} , и др.).

Для моделирования электромеханического преобразователя составлена эквивалентная магнитная цепь (рис. 5), в которой воздушные зазоры заменяются активными сопротивлениями, электрические катушки заменяются источниками магнитодвижущей силы (МДС), постоянные магниты в общем случае изображаются как эквивалентные источники МДС и т.д. [4]. Учитываются влияние индуктивности на скорость роста МДС при подаче управляющего сигнала и демпфирующие свойства магнитной системы.

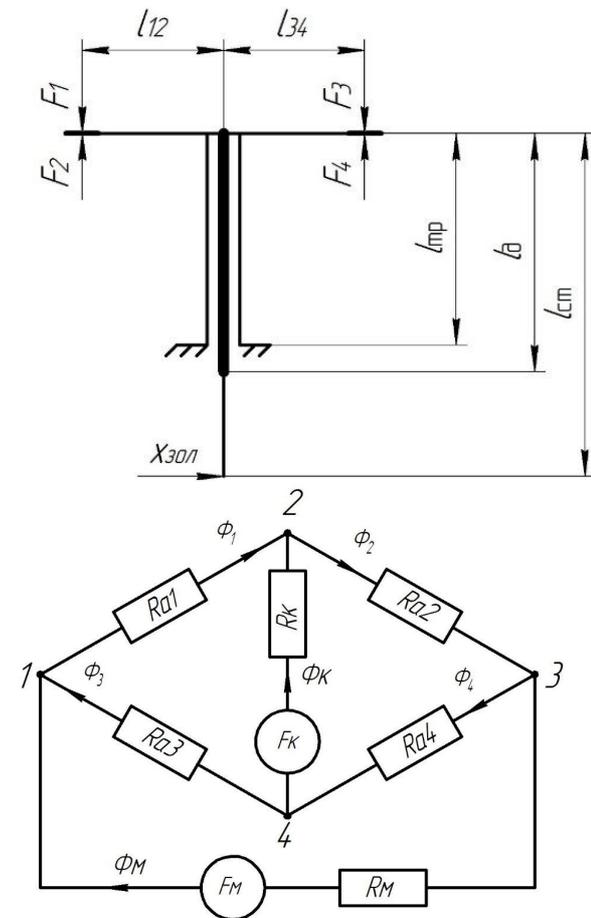


Рис. 5. Схемы упругой части (а) и магнитной цепи (б) электромеханического преобразователя

Для моделирования механической части системы составлены уравнения баланса сил и моментов, учитываются упругие свойства, массы и моменты инерции всех элементов.

К дросселирующим элементам гидроусилителей относятся: нерегулируемые дроссели, сопло-заслонка, окна золотникового распределителя и напорного сопла, используемого в струйных усилителях.

Характеристики большинства элементов можно представить с использованием коэффициента расхода [5]

$$\mu = \frac{Q}{S} \sqrt{\frac{\rho}{2(p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}})}},$$

где Q - расход жидкости через дросселирующий элемент; S - площадь дросселирующего элемента; $p_{\text{вх}}$, $p_{\text{вых}}$ - давление на входе и выходе дросселирующего элемента, ρ - плотность жидкости.

Исключение составляет только золотниковый распределитель, у которого в зоне малых перекрытий окон рабочими кромками золотника преобладают ламинарные утечки через зазоры.

Коэффициент расхода зависит от геометрических параметров дросселирующего элемента и режима течения, характеризующегося числом Рейнольдса Re , а также наличием и интенсивностью кавитации.

В связи со сложностью представления характеристик струйных каскадов в зависимости от геометрических параметров [6], была использована алгоритмическая (табличная) форма представления характеристики струйного каскада, полученная в результате расчетов в CFX-пакетах.

Поузловая динамическая модель ЭГУ реализована в виде программного комплекса, элемент интерфейса которого представлен на рис. 6.

3. Доводка параметров ЭГУ

Доводка параметров гидроусилителя является сложной комплексной задачей. Так, например, повышение коэффициента усиления в предварительном каскаде за счет увеличения прогиба заслонки (сопла; дефлектора) приводит к росту напряжений в гибкой трубке. Уменьшение зазора в магнитной си-

стеме приводит к росту потребляемой энергии, вместе с тем увеличивая нелинейность зависимости отклонения якоря от управляющего сигнала, что может привести к прилипанию якоря к полюсным наконечникам и т.д. Поскольку все зависимости между параметрами имеют нелинейный характер, доводка параметров ЭГУ значительно упрощается в случае применения нелинейной динамической модели.

Основные параметры разрабатываемого сервоклапана, включая параметры магнитной и упругой системы, были выбраны на стадии проектирования с использованием представленной выше модели. Тип и параметры струйного каскада подбирались на основании параметров аналогов с использованием CFX пакетов.

При доводке ЭГУ был спланирован эксперимент по определению запасов усталостной прочности упругих элементов. При моделировании переходных процессов ЭГУ было выявлено, что в гибкой трубке наибольшие напряжения возникают при переходном процессе, вызванном скачкообразным изменением управляющего сигнала; в пружине обратной связи наибольшие напряжения возникают при подаче управляющего сигнала повышенной амплитуды. На основании расчетов была разработана программа испытаний на многоцикловую усталость, при которой напряжения в упругих элементах значительно превышали значения, соответствующие нормальному режиму работы (на рис. 7 приведена фотография трещины на трубке). В результате экспериментов получены кривые Вёллера для материалов пружины обратной связи и трубки. На основании полученных данных о запасах усталостной прочности, подбором жесткости элементов с использованием узловой динамической модели

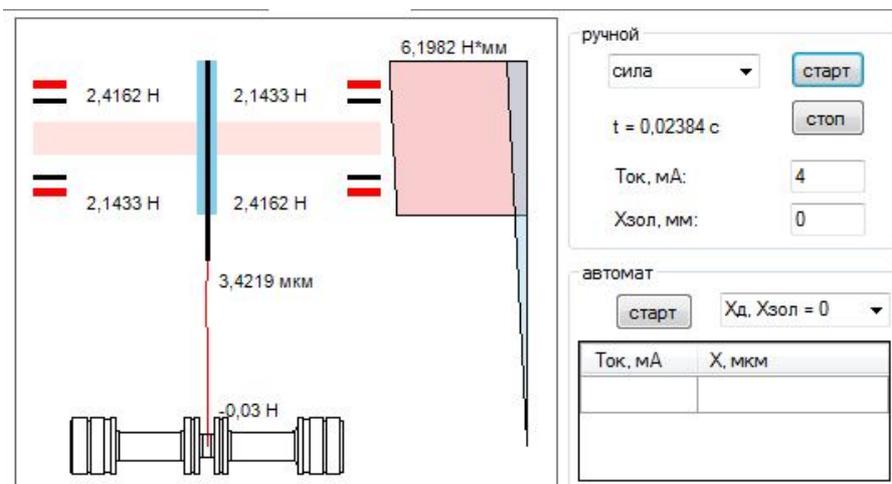


Рис. 6. Окно программного комплекса с визуализацией информации об упругой части системы

обеспечены максимальные коэффициенты усиления предварительного каскада при обеспечении заданной прочности.

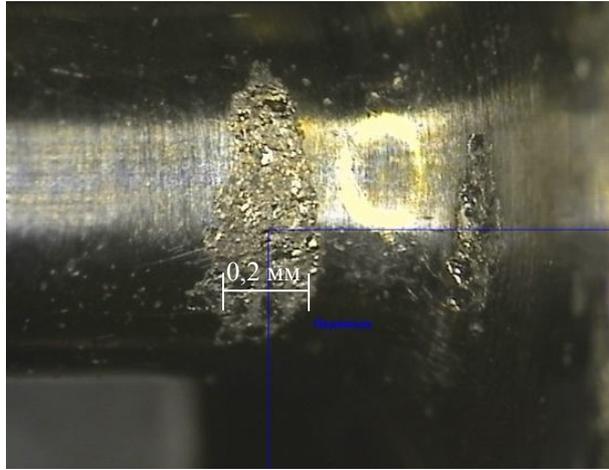


Рис. 7. Трещина на упругом элементе

Выводы

Сравнение различных видов устройств исполнительных механизмов авиационных двигателей, преобразующих электрические команды в механические и гидравлические, показало, что основным элементом, воспринимающим команды от электрической части системы, является электрогидравлический усилитель. Сравнение характеристик однокаскадного усилителя ПС7-5 и двухкаскадного ПМ15-500 показало, что однокаскадный ПС7-5 наиболее целесообразно применять в механизмах при относительно низких мощностях и высоких требованиях к надежности системы, а двухкаскадный ПМ15-500 - при высоких мощностях и жестких требованиях к скоростным характеристикам привода.

Структура поузловой динамической модели позволяет определять характеристики электрогидравлического усилителя на этапе проектирования, поскольку исходными данными являются приведенные параметры элементов, не зависящие от характерных размеров. Использование математической модели на этапе доводки параметров электрогидравлического усилителя является удобным инструментом, который позволяет определять неизмеряемые параметры, такие как силы в упругих элементах, что значительно ускоряет процесс доводки.

Литература

1. Кононыхин, Е. А. Система управления исполнительным механизмом авиационного двигателя на базе нечеткой логики [Текст] / Е. А. Кононыхин,

С. В. Епифанов, Е. В. Павлюк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 10(127). – С. 119-123.

2. Инженерные исследования гидроприводов летательных аппаратов [Текст] / Д. Н. Попов, С. А. Ермаков, И. Н. Лобода [и др.]. – М. : Машиностроение, 1978. – 141 с.

3. Замараев, Д. С. Оптимизация электрогидравлического усилителя для следящего привода с дроссельным регулированием [Электронный ресурс] / Д. С. Замараев, Д. Н. Попов // *Научное издание МТГУ им. Н. Э. Баумана «Наука и образование»*. – 2013. – № 12. – С. 105-124. – Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/637872.html>. – 12.05.2016. DOI: 10.7463/1213.0637872

4. Гомельский, Ю. С. Электрические элементы электрогидравлических устройств автоматики [Текст] / Ю. С. Гомельский. – М. : Энергия, 1968. – 144 с.

5. Крассов, И. М. Гидравлические усилители [Текст] / И. М. Крассов. – М. : Госэнергоиздат, 1959. – 90 с.

6. Расчет и проектирование устройств гидравлической струйной техники [Текст] / В. П. Бочаров, В. Б. Струтинский, В. Н. Бадах [и др.]. – К. : Техника, 1987. – 127 с.

References

1. Kononykhin, E. A., Yepifanov, S. V., Pavlyuk, E. V. Sistema upravlenija ispolnitel'nyh mehanizmom aviacionnogo dvigatelja na baze nechetkoj logiki [Aircraft engine control system based on fuzzy logic]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija - Aerospace technic and technology*, 2015, no. 10 (127), pp. 119-123.

2. Popov, D. N., Ermakov, S. A., Loboda, I. N., Fomichev, V. M., Shumilov, I. S., Popov, D. N. *Inzhenernye issledovanija gidroprivodov letatel'nyh apparatov* [Engineering analysis of aircraft hydraulic actuation system]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1978. 141 p.

3. Zamaraev, D. S., Popov, D. N. *Optimizacija jelektrogidravlicheskogo usilitelja dlja sledjashhego privoda s drossel'nyh regulirovaniem* [Servovalve optimization for servo actuation with throttle control]. Available at : <http://technomag.bmstu.ru/doc/637872.html>. (accessed 12.05.2016).

4. Gomeľ, Y. S. *Jelektricheskie jelementy jelektrogidravlicheskih ustrojstv avtomatiki* [Electrical components electrohydraulic control devices]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 144 p.

5. Krassov, I. M. *Gidravlicheskie usiliteli* [Hydraulic amplifiers]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1959. 90 p.

6. Bocharov, V. P., Strutinskii, V. B., Badakhshan, V. N., Customs, P. P. *Raschet i proektirovanie ustrojstv gidravlicheskoj strujnoj tehniki* [Calculation and design of the hydraulic jet technology systems]. Kiev, Technology Publ., 1987. 127 p.

Поступила в редакцию 09.11.2016, рассмотрена на редколлегии 7.12.2016

ДОВЕДЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОВУЗЛОВИХ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Є. О. Кононихін, С. В. Єпіфанов

Обговорюються основні тенденції у використанні пристроїв виконавчих механізмів авіаційних двигунів, що перетворюють електричні команди в механічні та гідравлічні. Проведено порівняння характеристик електрогідравлічних підсилювачів ПС7-5 і ПМ15-500, які отримали найбільше поширення на пострадянському просторі. Обґрунтовано актуальність використання струменевих попередніх каскадів посилення електрогідравлічних підсилювачів. Описано структуру повузлової динамічної універсальної моделі електрогідравлічних підсилювачів. Наведено приклад використання математичної моделі при доведенні параметрів на етапі доводочних випробувань електрогідравлічних підсилювачів.

Ключові слова: електрогідравлічний підсилювач, сопло-заслонка, дефлектор, повузлова динамічна модель.

BACKFITTING OF SERVOVALVE CHARACTERISTICS USING UNIT LEVEL DYNAMIC MODELS

E. A. Kononykhin, S. V. Yepifanov

The main trends in the use of aircraft engines electromechanical and electrohydraulic converters are discussed. Characteristics of PS7-5 and PM15-500 servovalve, which are the most prevalent in the post-Soviet space, are compared. The structure of a unit level dynamic models of servovalve is described. An example of the use of a mathematical model of the final design stage is given.

Key words: servovalve, nozzle-flap, deflector, unit level dynamic model.

Кононыхин Евгений Александрович – начальник расчетно-перспективного отдела, ПАО «ФЭД», Харьков, Украина, e-mail: kjek@ya.ua.

Епифанов Сергей Валериевич – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

Kononykhin Eugene Alexandrovich - head of advanced engineering department of PJSC "FED", Kharkov, Ukraine, e-mail: kjek@ya.ua.

Yepifanov Sergiy Valeriyevich - Dr. Sc. Sciences, prof., head of aircraft engines design department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: aedlab@gmail.com.