

УДК 62-347

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО ВЗАИМОНАГРУЖЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РУЛЕВЫХ ПРИВОДОВ ПРИ ИХ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ

Алексеев А.С., Ерофеев Е.В., Найденев А.В.

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, e-mail: naydenov.alexey@gmail.com

В статье представлены результаты исследования совместной работы гибридного электрогидравлического рулевого привода, являющегося действующим образцом двухрежимных электрогидравлических рулевых приводов, как наиболее перспективных при реализации и развитии концепции «более электрического самолета», и электрогидравлического привода с дроссельным регулированием скорости, как наиболее распространенного среди существующих пилотируемых летательных аппаратов. Исследование проведено с применением метода математического моделирования и рассматривало как работу каждого привода в отдельности, так и модель их совместной работы. Показано, что при совместной работе указанных выше разнородных электрогидравлических рулевых приводов в режиме суммирования усилий на единой поверхности управления, на выходных звеньях приводов возникает силовое взаимонагружение, что негативно сказывается на ресурсе конструкции и качестве регулирования приводов в области малых сигналов управления. В статье приведены результаты математического моделирования разработанной авторами системы выравнивания усилий и показана возможность существенного снижения силового взаимонагружения в приводах при включении в контур управления указанной выше системы выравнивания усилий. Достоверность работы математических моделей каждого из приводов подтверждена экспериментальными исследованиями, проведенными при помощи стендовых испытаний гибридного электрогидравлического рулевого привода ПМ.00, а также электрогидравлического привода с дроссельным регулированием скорости РПД-15АМ.

Ключевые слова: гибридный электрогидравлический рулевой привод, двухрежимный электрогидравлический рулевой привод, комбинированное регулирование скорости, силовое взаимонагружение, система выравнивания усилий, электрогидравлический рулевой привод

RESEARCH OF THE FORCE FIGHTING AT THE JOINT WORK DISSIMILAR ELECTROHYDRAULIC ACTUATOR

Alekseenkov A.S., Erofeev E.V., Naydenov A.V.

Federal State Budgetary Educational Institution «Moscow Aviation Institute (National Research University)», Moscow, naydenov.alexey@gmail.com

The article presents the results of the study of joint work of hybrid electrohydraulic actuator which is an operating model of Electrical-Backup Hydraulic Actuator, as the most promising in the implementation and development of the concept of «more electric aircraft» and electrohydraulic actuator with throttle speed control, as the most common among existing manned aircraft. The research was carried out using the method of mathematical modeling and considered both the work of each actuator separately and the model of their joint work. It is shown that at joint work of the above mentioned heterogeneous electrohydraulic actuator in a mode of summation of efforts on a uniform control surface, on an output links of actuators there is a power mutual loading that negatively affects a resource of a design and quality of regulation of actuators in the small control signals. The article presents the results of developed by the authors force equalization system mathematical modeling and shows the possibility of significant reduction of force fighting in the actuators when including the above-mentioned force equalization system in the control loop. Each actuator mathematical models' reliability is confirmed by experimental researches carried out by means of bench tests of hybrid electro-hydraulic actuator PM.00 and electro-hydraulic actuator with throttle regulation of speed RPD-15AM.

Keywords: combine speed regulation, electrical-backup hydraulic actuator, electro-hydrostatic actuator, force equalization system, force fighting, hybrid electro-hydraulic actuator

Все чаще в современной технической литературе встречается термин «более электрический самолет» [1–3]. Под этим термином понимают самолет, в котором одна или несколько централизованных гидросистем заменяется силовыми электрическими системами. С точки зрения исполнительной части системы управления такая тенденция приводит к необходимости разработки и внедрения новых типов рулевых приводов, способных осуществлять собственное энергопитание от силовой электросистемы самолёта, обладая при

этом высокими статическими, динамическими и энергетическими характеристиками, а также потребным уровнем надежности и отказобезопасности.

Среди существующих электрогидравлических рулевых приводов, применяемых или планируемых к применению на борту «более электрического самолета», можно выделить следующие основные типы:

1. Электрогидростатические рулевые приводы (ЭГСР или Electro-Hydrostatic Actuator – EHA).

2. Электрогидравлические рулевые приводы с комбинированным регулированием скорости (ЭГРП-КРС [4, 5]).

3. Двухрежимные электрогидравлические рулевые приводы (ДГРП или Electrical-Backup Hydraulic Actuator – EBHA [6, 7])

Как показывает обзор архитектур комплексов систем управления (КСУ) современных гражданских самолётов [8], ведущими мировыми производителями авиационной техники рассматриваются варианты установки на одну рулевую поверхность управления (в том числе на основные поверхности управления) нескольких разнородных электрогидравлических рулевых приводов [9–11]. Кроме того, на существующем пассажирском самолёте Airbus A-380 приводы основных рулевых поверхностей управления разнородны как по энергопитанию, так и по способу регулирования скорости выходного звена. Так, например, секции руля направления отклоняются двухрежимными рулевыми приводами, а на рулях высоты установлены ЭГРП и ЭГСП.

Указанная выше тенденция показывает, что при реализации современных архитектур КСУ пассажирских и транспортных ЛА уже рассматривается потенциальная возможность организации совместной работы разнородных электрогидравлических рулевых приводов на единую поверхность управления. Это означает, что вопрос исследования совместной работы разнородных приводов и определения способов снижения их силового взаимонагружения разнородных приводов является актуальным и востребованным.

Цель исследования: изучение потенциальной возможности организации совместной работы разнородных электрогидравлических рулевых приводов на единую

поверхность управления. В качестве объектов исследования авторами работы выбраны следующие типы приводов: двухрежимный электрогидравлический рулевой привод, как наиболее перспективный, по мнению ряда авторов [12–14], тип электрогидравлических приводов с электрическим энергопитанием, и привод с дроссельным регулированием скорости (ЭГРП), как наиболее часто применяемый тип рулевых приводов на борту существующих пилотируемых ЛА. Указанные выше приводы разнородны по типу силового энергопитания. При этом в качестве действующего образца двухрежимного привода авторами выбран «гибридный привод ПМ.00», выполненный по оригинальной конструктивной схеме.

Материалы и методы исследования

Исследование совместной работы осуществлялось методом математического моделирования: в программе MatLab Simulink. Авторами была разработана математическая модель гибридного электрогидравлического рулевого привода, общая структура которой приведена на рис. 1, и математическая модель типового электрогидравлического привода с дроссельным регулированием скорости, структура которой приведена на рис. 2.

Для подтверждения результатов, полученных с помощью математического моделирования и окончательной верификации математической модели, авторами произведен ряд экспериментальных исследований гибридного электрогидравлического рулевого привода ПМ.00 на стенде ЦАГИ.

На рис. 3 продемонстрирована испытательная установка и привод, размещенный на стенде. По результатам проведённых экспериментов были получены характеристики привода, на основании которых производилась верификация математической модели, что позволило окончательно подтвердить достоверность результатов исследования методом математического моделирования.

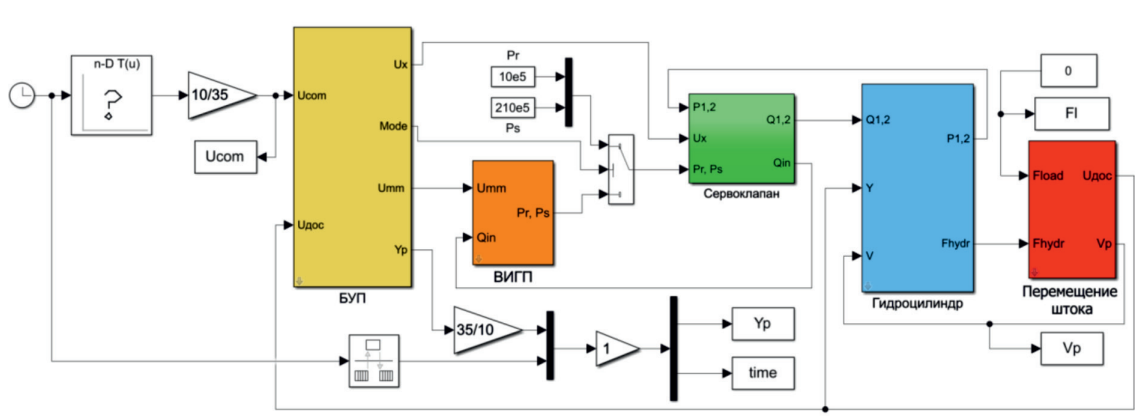


Рис. 1. Структура математической модели гибридного электрогидравлического рулевого привода

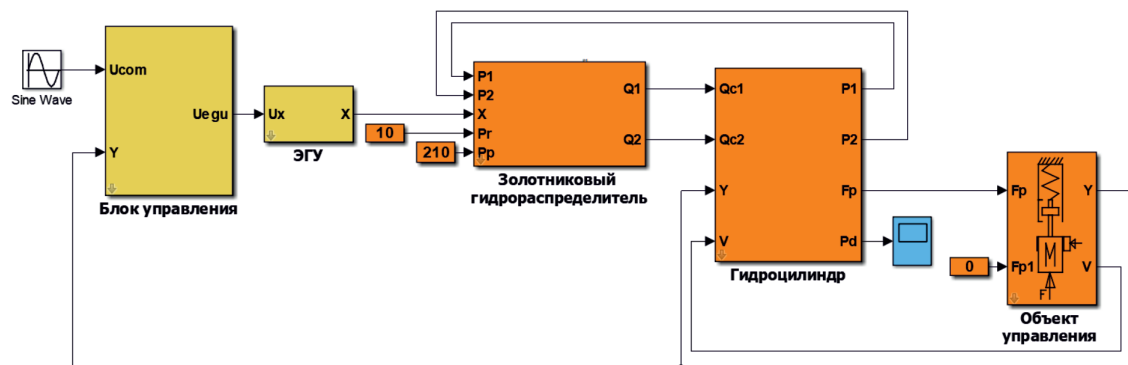


Рис. 2. Структура математической модели электрогидравлического рулевого привода с дроссельным регулированием скорости



Рис. 3. Экспериментальная установка гибридного электрогидравлического рулевого привода

При исследовании совместной работы рулевых приводов методом математического моделирования предполагалось, что исследуемые приводы будут установлены на одной рулевой поверхности управления и имеют одинаковые или близкие (не более 10% разницы) номинальные скорости холостого хода и тормозные усилия на поршне, а также ход штока поршня. Кроме того, для достижения целей проводимого исследования авторами рассматривается худший случай работы рулевых приводов, при котором их выходные звенья жестко соединены между собой (шток в шток). При таком подключении взаимонагружение не снижается за счет конечной жесткости узлов крепления ЭГРП к рулевой поверхности и скручивания силовой балки, что позволит определить максимальную величину силового взаимонагружения и разработать наиболее эффективную систему выравнивания усилий (СВУ).

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе перемещения штоков ЭГРП невозможно обеспечить идентичность скоростей движения, из-за чего при обработке приводами гармонического или иного закона управления без введения в контур управ-

ления СВУ на выходных звеньях приводов происходит существенное их взаимонагружение, регистрируемое датчиками перепада давления в полостях каждого гидроцилиндра. Взаимонагружение может возникать и в статическом состоянии в случае, например, смещения нулевого положения датчиков обратной связи у каждого из приводов.

Для компенсации силового взаимонагружения приводами авторами была разработана система выравнивания усилий в каждом из приводов и проведено исследование эффективности работы при организации различных схем её включения в контуры управления приводами:

- «ведомый – ведущий», где ведомым является ЭГРП, а ведущим – ДГРП. Коррекция при этом реализуется только в ЭГРП;
- «ведомый – ведущий», где ведомым является ДГРП, а ведущим – ЭГРП. Коррекция при этом реализуется только в ДГРП;
- СВУ реализуется в двух приводах.

Пример реализации СВУ в контуре управления приводом с дроссельным регулированием скорости приведен на рис. 4. Стоит также отметить, что в процессе исследования предполагалось, что объектом применения рассматриваемых приводов является рулевая поверхность неманевренного самолёта, а значит, от приводов не требовались высокие динамические возможности, и контрольными частотами для гармонического управляющего сигнала являлись частоты до 3...5 Гц.

По результатам проведенных исследований было показано, что разработанная система выравнивания усилий существенно снижает силовое взаимонагружение в приводах. В качестве примера на рис. 5 показана работа рассматриваемых приводов при обработке 50% управляющего сигнала с частотой 0,25 Гц, при этом ДГРП работает в режиме комбинированного регулирования скорости.

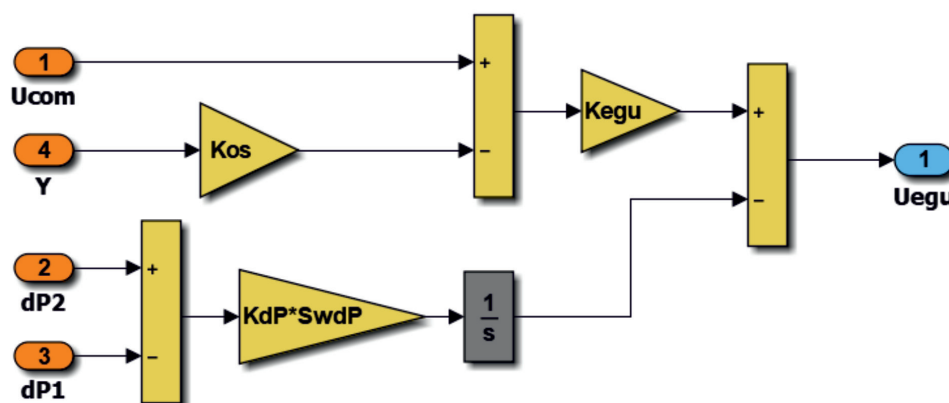


Рис. 4. Реализация системы выравнивания усилий на примере алгоритма управления ЭГРП. На рисунке введены следующие обозначения: U_{com} – сигнал управления, Y – положение штока привода, $dP2$ – перепад давления в гидроцилиндре ЭГРП, $dP1$ – перепад давления в гидроцилиндре ДГРП, Kos – коэффициент обратной связи ЭГРП, $Kegu$ – коэффициент усиления сигнала ошибки, KdP – коэффициент усиления сигнала рассогласования по давлению, $SwdP$ – признак включения коррекции по давлению, U_{egu} – сигнал управления на ЭГУ привода

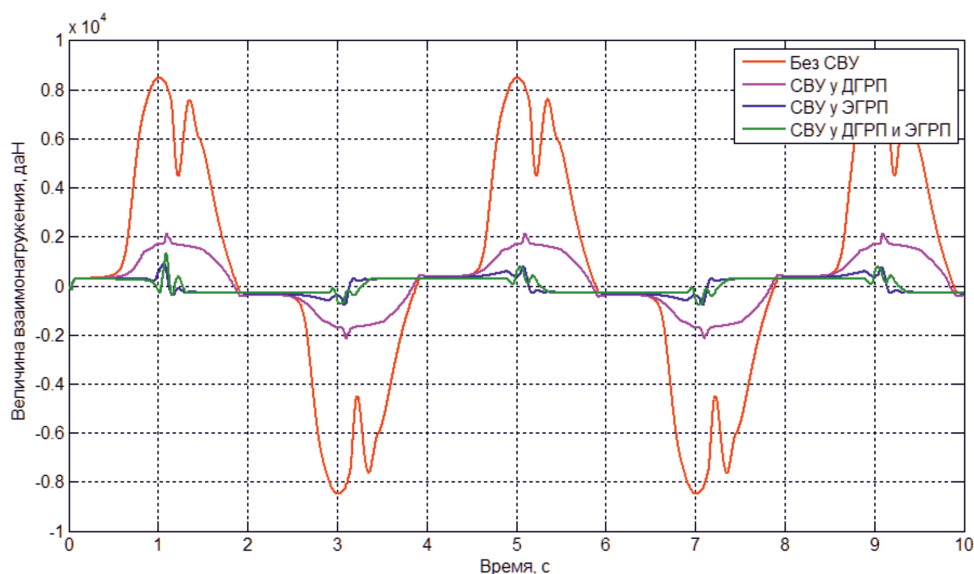


Рис. 5. Силовое взаимонагружение рассматриваемых приводов при выбранных схемах снижения силового взаимонагружения (коррекции характеристик) и отработке приводами гармонического закона управления

Стоит отметить, что отработка приводами ступенчатых входных сигналов авторами в статье не приводится ввиду ограничения на объем публикации. Тем не менее указанные выше случаи рассматривались.

Выводы

В результате проведенного исследования было установлено, что при работе разнородных электрогидравлических рулевых приво-

дов на единую поверхность управления возникает их силовое взаимонагружение.

С целью снижения силового взаимонагружения и коррекции выходных характеристик приводов была разработана система выравнивания усилий, явившаяся частью алгоритма управления ЭГРП, и рассмотрены следующие случаи:

– реализация схемы «ведомый – ведущий», где ведомым является ЭГРП, а веду-

щим – ДГРП. Коррекция при этом реализуется только в ЭГРП;

– реализация схемы «ведомый – ведущий», где ведомым является ДГРП, а ведущим – ЭГРП. Коррекция при этом реализуется только в ДГРП;

– коррекция в двух приводах.

Полученные результаты показали:

– снижение силового взаимонагружения приводов возможно средствами управления без доработки конструкции приводов (предполагалось, что в конструкции уже присутствуют датчики давления в гидроцилиндре);

– при реализации схемы «ведомый – ведущий», где ведомым является ЭГРП, а ведущим – ДГРП, силовое взаимонагружение удалось снизить до 16% от максимальной развиваемой каждым из приводов силы;

– при реализации схемы «ведомый-ведущий», где ведомым является ДГРП, а ведущим – ЭГРП, силовое взаимонагружение удалось снизить до 21% от максимальной развиваемой каждым из приводов силы;

– при реализации коррекции сразу в двух приводах силовое взаимонагружение удалось снизить до 10% от максимальной развиваемой каждым из приводов силы.

Сказанное выше позволяет утверждать, что рациональнее делать систему выравнивания усилий в двух приводах или, если это технически невозможно, то строить структуру по принципу «ведомый – ведущий», где ведомым является ЭГРП (ввиду его лучшей динамики), а ведущим – ДГРП, или при реализации СВУ сразу в двух приводах. Это обусловлено в том числе тем фактом, что реальная максимальная скорость исследуемого ЭГРП выше скорости холостого хода исследуемого ДГРП. Кроме того, быстродействие ЭГРП значительно выше.

Можно также отметить, что в проведенном исследовании не рассматривались случаи работы приводов под нагрузкой, однако, как показывает опыт авторов, силовое взаимонагружение приводов снижается при росте внешней нагрузки, воздействующей на ЭГРП через объект управления.

Список литературы

1. Mare J.C. *Aerospace Actuators 2: Signal-by-Wire and Power-by-Wire*. New-York: Wiley. 2017. 282 p.
2. Sarlioglu B., Morris C.T. *More electric aircraft: review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft*. IEEE transactions on transportation electrification. 2015. № 1. P. 54–64.
3. Алексеенков А.С., Найденов А.В., Селиванов А.М. Развитие авиационных автономных электрогидравлических приводов // Вестник Московского авиационного института. 2012. № 1. С. 43–48.
4. Селиванов А.М. Автономный электрогидравлический рулевой привод с комбинированным регулированием скорости выходного звена // Вестник Московского авиационного института, 2010. № 3. С. 37–41.
5. Селиванов А.М. Принцип комбинированного регулирования скорости выходного звена гидравлического привода и его современная реализация // Вестник Московского авиационного института. 2011. № 3. С. 147–151.
6. Le tron X. *A380 Flight Controls overview*. Presentation at Hamburg University of Applied Sciences. 2007. P. 8–9.
7. Bossche D. *The A380 Flight control electrohydrostatic actuators, achievements and lessons learnt*. 25-th international congress of the aeronautical sciences. 2006. P. 1–8.
8. Алексеенков А.С., Ермаков С.А., Константинов С.В., Кузнецов В.Е., Оболенский Ю.Г., Редько П.Г. Системы электрогидравлических рулевых приводов комплексов управления полетом самолетов. СПб.: СПбГЭ, 2019. 25 с.
9. Wheeler P. *Technology for the more and all electric aircraft of the future*. IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA). 2016. P. 1–5.
10. Fu J., Mare J.C., Fu Y. *Modelling and simulation of flight control electromechanical actuators with special focus on model architecting, multidisciplinary effects and power flows*. Chinede journal of aeronautics. 2017. № 30 (1). P. 47–65.
11. Zhao J., Shen G., Zhu W., Yang C., Agrawal S.K. *Force tracking control of an electro-hydraulic control loading system on a flight simulator using inverse model control and a damping compensator*. Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2018. № 40 (1). P. 135–147.
12. 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. Москва, 2014. 14 с.
13. Alekseenkov A.S., Ermakov S.A., Kiselev M.A., Konstantinov S.V., Obolensky Yu.G. *Temperature measurements at critical points of dual-mode electrohydraulic actuator with combined rate control*. Periodico Tche Quimica. 2018. № 15 (1). P. 396–404.
14. Ismail M., Balaban E., Spangenberg H. *Fault detection and classification for flight control electromechanical actuators*. IEEE Aerospace Conference. 2016. P. 1–10.