



Энергетическая математическая модель авиационного блока передачи мощности

С. Ю. Константинов	кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной гидромеханики; Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа; email: konstserge@mail.ru
Д. А. Кудерко	кандидат технических наук, директор центра проектирования; Холдинг «Технодинамика», г. Москва; email: dm_kuderko@mail.ru
Н. А. Поляков	заместитель директора центра проектирования; Холдинг «Технодинамика», г. Москва; email: polyakovna@tdhc.ru
В. А. Целищев	доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной гидромеханики; Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа; email: pgl.ugatu@mail.ru

В статье предложена энергетическая математическая модель авиационного блока передачи мощности, а также результаты экспериментальных исследований модельного блока передачи мощности на стенде «Диагностика и идентификация гидросистем» кафедры прикладной гидромеханики ФГБОУ ВО УУНУТ. Произведена валидация предложенной математической модели с экспериментом, показавшая хорошую непротиворечивость и достаточную достоверность. Выполнено сравнение энергетической модели блока передачи мощности с существующими и оценены перспективы её применения.

Ключевые слова: блок передачи мощности; PTU; насос; гидромотор; математическая модель блока передачи мощности; испытание блока передачи мощности

Цитирование: Константинов, С. Ю. Энергетическая математическая модель авиационного блока передачи мощности / С. Ю. Константинов, Д. А. Кудерко, Н. А. Поляков, В. А. Целищев // Динамика и виброакустика. – 2025. – Т. 11, №1. – С. 51-61. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-1-51-61

Введение

Одной из наиболее важных задач при проектировании летательного аппарата (самолёта, вертолёт, беспилотника, ракеты-носителя) является создание системы управления. Система управления летательным аппаратом должна обеспечивать управление по каналам тангажа, рысканья, крена, выпуск (уборку) шасси, торможение и реверс двигателей, а также выполнение вспомогательных функций – открытие (закрытие) люков, очистку фонаря кабины от капель дождя и снега, поворот фар и т.д. и т.п. Система управления летательным аппаратом относится к системам жизнеобеспечения и поэтому должна отвечать повышенным тре-

бованиям надёжности, безопасности, регламентируемым нормами лётной годности самолётов (РФ) и сертификацией ИКАО. Ключевым звеном системы управления самолётом является гидравлическая система.

Современные гражданские самолёты в целях повышения надёжности и безопасности оснащены трёх- и четырёхконтурными гидравлическими системами [1, 2, 3], а управление по критическим поверхностям (рули высоты, направления, элероны) резервировано не менее чем от двух контуров гидравлической системы с дублированием механического канала [4]. Наиболее частой нештатной ситуацией в работе гидравлической системы самолёта является отказ источников питания одного из контуров по причине отказа двигателя, разрыва трубопроводов между двигателем и контуром, потери электрического питания и т.д. и т.п. В этом случае применяются различные конструктивные решения:

- 1) перепуск жидкости из одного контура гидросистемы в другой [1];
- 2) ввод в действие аварийной системы [2];
- 3) применение блока передачи мощности PTU [3].

Перепуск жидкости из одного контура в другой почти не применяется на современных самолётах, так как при потере герметичности приводит к дальнейшему отказу всей гидросистемы. Аварийные гидравлические системы применяются исключительно на больших и широкофюзеляжных самолётах (например, Ил-96, Boeing 747) и обеспечивают избыточный уровень надёжности, повышают стоимость и сложность эксплуатации. На большинстве современных гражданских самолётов используется трёхконтурная гидравлическая система, в которой, в случае отказа источников питания или разгерметизации одного из контуров, гидравлическая энергия от исправного контура передаётся с помощью блока передачи мощности [3, 4].

Блок передачи мощности (PTU) – гидромеханический агрегат, позволяющий передавать энергию из одной гидросистемы в другую без перелива рабочей жидкости (рисунок 1).



Рисунок 1 – Авиационные блоки передачи мощности Parker (а) и Vickers (б)
а – PTU Parker [5]; б – PTU Vickers [6]

В настоящее время в гидросистемах летательных аппаратов используются блоки передачи мощности двух зарубежных фирм: Parker [5] и Eaton Vickers [6]. PTU Parker состоит из двух симметричных аксиально-поршневых объёмных гидромашин с наклонным диском без управления, соединённых друг с другом механической связью. PTU Eaton Vickers состоит из гидромотора с наклонным блоком и несиловым карданом и насоса с наклонным диском, связанными друг с другом механической муфтой.

Для проектирования отечественного блока передачи мощности необходимо создание энергетической математической модели, которая свяжет основные внешние, внутренние и механические характеристики.

1 Энергетическая математическая модель блока передачи мощности

Конструктивно блок передачи мощности состоит из объёмного гидромотора ГМ, насоса Н и механической передачи. Принцип работы блока передачи мощности заключается в преобразовании гидравлической энергии гидромотором ГМ в механическую от контура 1 с последующим преобразованием в гидравлическую насосом Н контура 2 (рисунок 2).

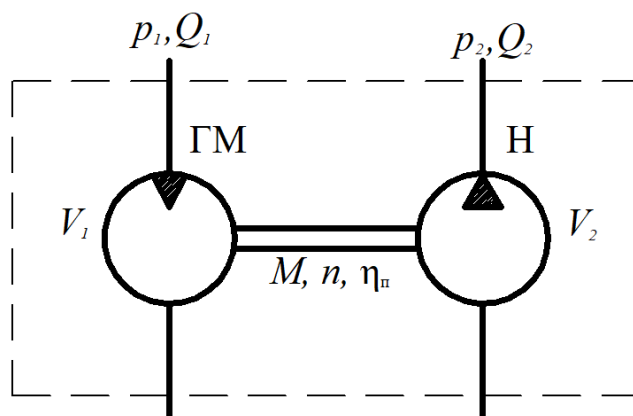


Рисунок 2 – Структурная схема авиационного блока передачи мощности

Энергетическая математическая модель блока передачи мощности состоит из следующих уравнений:

1) Баланс расходов:

$$n = \frac{Q_1}{V_1 \eta_{10}} = \frac{Q_2}{V_2 \eta_{20}}, \quad (1)$$

где n – частота вращения вала блока передачи мощности; Q_1 – расход через гидромотор; Q_2 – расход через насос; V_1 – рабочий объем гидромотора; V_2 – рабочий объем насоса; η_{10} – объемный КПД гидромотора; η_{20} – объемный КПД насоса.

Из баланса расходов расход насоса 2 контура:

$$Q_2 = Q_1 \frac{V_2 \eta_2^0}{V_1 \eta_1^0}. \quad (2)$$

2) Баланс энергий:

$$N = p_1 Q_1 \eta_1 = M \frac{\pi n}{30} \eta_{\pi} = p_2 Q_2 \eta_2 \eta_{\pi}, \quad (3)$$

где N – передаваемая мощность, η_1 – КПД гидромотора; M – момент на валу блока передачи мощности; p_1 – давление на гидромоторе; p_2 – давление, создаваемое насосом; η_{π} – КПД механической передачи между насосом и гидромотором; η_2 – КПД насоса.

Из баланса энергий (с учетом баланса расходов) давление во втором контуре:

$$p_2 = p_1 \frac{Q_1 \eta_1}{Q_2 \eta_2 \eta_{\pi}} = p_1 \frac{V_1 \eta_1 \eta_1^0}{V_2 \eta_2 \eta_{\pi} \eta_2^0}. \quad (4)$$

Анализ зависимостей для расхода (2) и энергии (3) показывает, что при проектировании блока передачи мощности ($V_1=V_2$) необходимо подбирать гидравлические машины с одинаковым объемным и общим КПД, а потери в механической передаче (η_{π}) компенсировать увеличением объема насоса Н. Так как КПД аксиально-поршневых гидромоторов увеличивается с частотой вращения, а насосов – уменьшается, рекомендуется выбирать частоту

вращения в диапазоне перекрёста частотных характеристик. Из-за неравномерности подачи объёмных гидромашин обеспечивать жёсткую связь между гидромотором и насосом недопустимо.

Оценка эффективности работы блока передачи мощности производится при помощи коэффициента передачи энергии (КПЭ), показывающего соотношение между соотношением передаваемых мощностей N_1 и N_2 из системы 1 в систему 2 и фиксированным передаточным отношением гидромотора ГМ и насоса Н по рабочим объёмам V_1 и V_2 :

$$\eta_{PTU} = \frac{k_{пэ}}{k_{пт}} = \frac{\frac{N_2}{N_1}}{\frac{V_2}{V_1}} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{V_1}{V_2}, \quad (5)$$

При постоянном давлении питания внешняя характеристика блока передачи мощности представляет прямую, параллельную оси абсцисс:

$$M = \frac{\Delta p V_1}{63} \frac{1}{\eta_1}, \quad (6)$$

$$M = \frac{30 N}{\pi n} \frac{1}{\eta_n}, \quad (7)$$

где η_n – КПД передачи (механический КПД блока передачи мощности).

$$n = \frac{N}{p_1 V_1} \frac{1}{\eta_1^0 \eta_1} = \frac{N}{p_2 V_2} \frac{1}{\eta_2^0 \eta_2 \eta_n}. \quad (8)$$

2 Экспериментальные исследования модельного образца блока передачи мощности

Для верификации энергетической математической модели авиационного блока передачи мощности проводились экспериментальные исследования модельного образца блока передачи мощности на стенде «Диагностика и идентификация гидравлических систем» кафедры «Прикладная гидромеханика» Уфимского университета науки и технологий. Схема подключения модельного блока передачи мощности к стенду представлена на рисунке 3 и состоит из двух независимых контуров: 1) контура 1, включающего электродвигатель ЭД и насос Н1 с предохранительным клапаном КП, датчиком расхода насоса DR1 и датчиками давления до и после гидромотора DD3 и DD2 соответственно; 2) контура 2, состоящего из насоса Н3, пропорционального дросселя КД и датчиков расхода DR1 и давления DD1. Гидромотор ГМ и насос Н3 соединены через две муфты и датчик крутящего момента (ДКМ) и частоты вращения (ДЧВ).

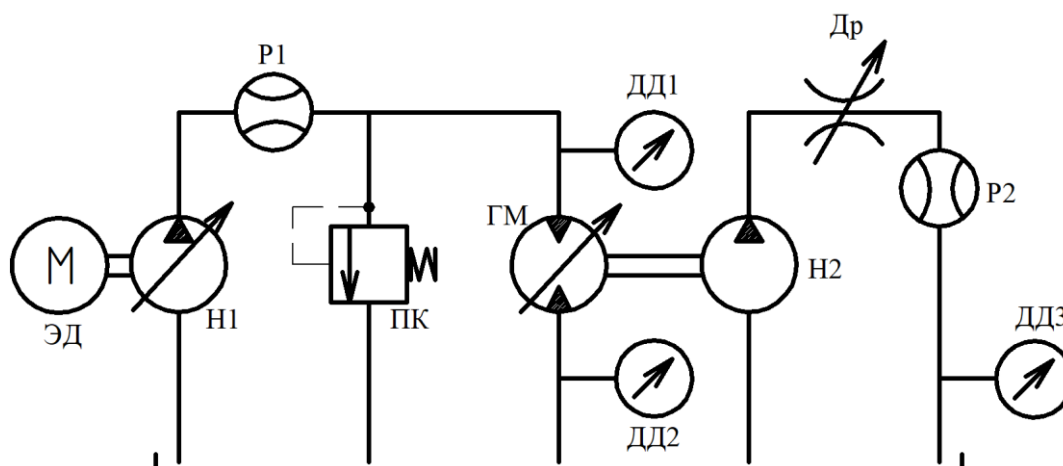


Рисунок 3 – Схема подключения модельного блока передачи мощности к стенду
 ЭД – электродвигатель; Н1 – насос первого контура; Р1 – расходомер первого контура;
 ПК – предохранительный клапан; ГМ – гидромотор; ДД1, ДД2 – датчики давления гидромотора; Н2 – насос второго контура; Др – регулируемый дроссель; Р2 – расходомер второго контура; ДД3 – датчик давления

Стенд «Диагностика и идентификация гидравлических систем» имеет автоматизированную систему управления на основе программы LabVIEW. Цель испытаний модельного блока передачи мощности – получение внешних (механических) и внутренних (гидравлических) характеристик. Внешний вид модельного блока передачи мощности представлен на рисунке 4. Технические характеристики основных гидроагрегатов представлены в таблице 1.



Рисунок 4 – Модельный блок передачи мощности
 ГМ – гидромотор; Н3 – насос; ДЧВ – датчик частоты вращения; ДКМ – датчик крутящего момента;
 ДД2 – датчик давления на входе в гидромотор; ДД3 – датчик давления на выходе из гидромотора

Результаты экспериментов сводились в таблицы, а обработка результатов проводилась для каждого контура блока передачи мощности по отдельности. При обработке учитывались характеристики основных агрегатов, указанные в таблице 1. Результаты эксперимента представлены в таблицах 2 и 3, а также на рисунках 5 и 6.

Таблица 1 – Основные технические характеристики агрегатов

Название	Обознач.	Маркировка	Тип	Характеристики	
Гидромотор	ГМ	Parker V12-060-TF-IV-D-000-D-P-060/035	Аксиально-поршневой с наклонным блоком	Рабочий объём, см ³ , максимальный/минимальный	80/35
Насос	НЗ	Bucher QXM53-063	Шестерённый	Рабочий объём, см ³	63
Насос	Н1	Parker PV063R1K1T1NFPV	Аксиально-поршневой с наклонным диском	Рабочий объём, см ³ , максимальный/минимальный	63/0
Электродвигатель	ЭД	Siemens 1LG4 223-4AA	Асинхронный	Частота вращения, об/мин	1475
Дроссель	КД	Parker TDA025EW09B2NXW	Золотниковый	Расход максимальный, л/мин	100

3 Верификация математической модели блока передачи мощности

Верификация энергетической математической модели проводилась для случая 1) переменного давления питания; 2) постоянного давления питания.

При переменном давлении внешняя экспериментальная характеристика блока передачи мощности состоит из двух частей (рисунок 5): 1) переменное давление; 2) работа регулятора постоянного давления (при уменьшении частоты вращения). Расчёт момента для первой части характеристики проводился по формуле 7 с учётом КПД передачи $\eta_{\text{п}} = 0,8$ (механические КПД муфт, потери в датчике момента, потери на трение в гидромашинах, потери из-за жёсткости крепления гидромашин к стенду). Расчёт момента для второй части характеристики выполнялся по формуле 6 с учётом полного КПД гидромотора $\eta_1 = 0,6$ (с понижением частоты вращения эффективность гидромотора падает линейно). Результаты расчётов приведены в таблице 2. Графики верификации характеристик приведены на рисунке 5.

Таблица 2 – Верификация при переменном давлении

№	Q_1 , л/мин	n , об/мин	M_3 , Н·м	N_1 , кВт	M_t , Н·м	Δ , %	Примечание
1	12	424	5,2	0,96	5,256065	1,078167	
2	12	416	5,6	1,04	5,769231	3,021978	
3	11	376	7,5	1,466667	7,836246	4,483283	
4	10	347	8,9	1,733333	9,160148	2,923014	
5	10	319	10,5	2,083333	11,75549	11,95701	
6	10	275	12,2	2,283333	12,68519	3,976928	регулятор
7	10	230	12,35	2,333333	12,96296	4,963263	регулятор
8	10	211	12,6	2,316667	12,87037	2,145797	регулятор
9	10	143	13,2	2,4	13,33333	1,010101	регулятор
10	10	76	13,5	2,45	13,61111	0,823045	регулятор
Эксперимент					Теория	Отклонение	

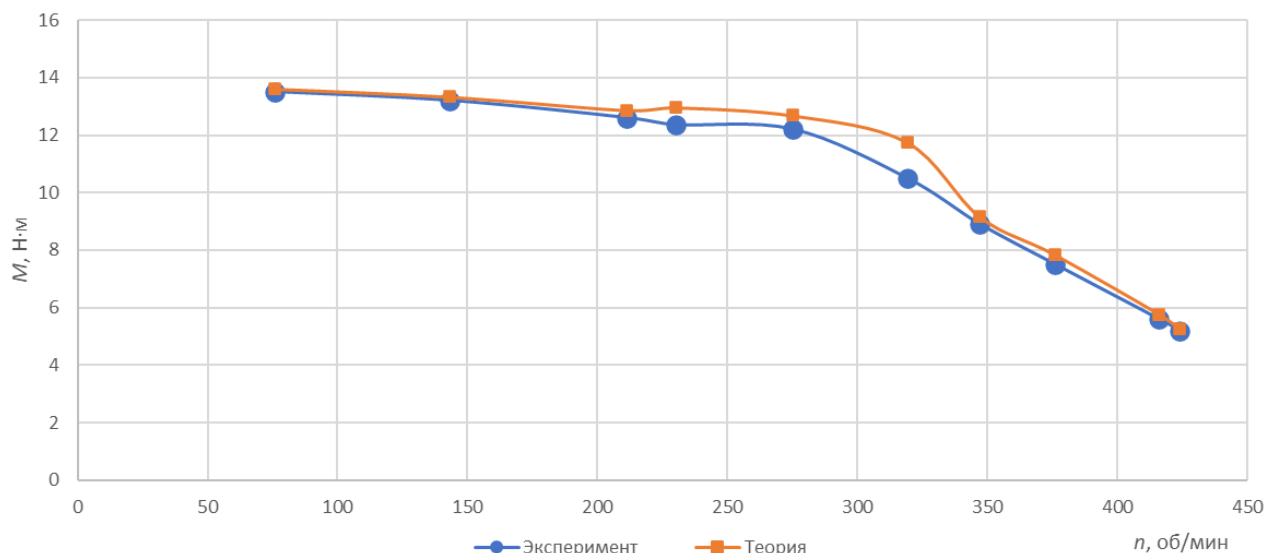


Рисунок 5 – Экспериментальная и теоретическая характеристика блока передачи мощности при переменном давлении питания и работе регулятора постоянного давления

При постоянном давлении внешняя экспериментальная характеристика блока передачи мощности представляет прямую, параллельную оси абсцисс. Расчёт крутящего момента выполнялся по формуле 6 с учётом полного КПД гидромотора $\eta_1=0,6$. Результаты расчётов приведены в таблице 3. Графики верификации характеристик приведены на рисунке 6.

Таблица 3 – Верификация при постоянном давлении

№	Q_1 , л/мин	p_{11} , атм	p_{12} , атм	n , об/мин	$M_э$, Н·м	$M_т$, Н·м	Δ , %
1	17	58	0	603	6,4	6,444444	0,694444
2	17	58	0	310	6,6	6,444444	2,356902
3	17	58	0	209	6,8	6,444444	5,228758
4	17	59	0	138	6,9	6,555556	4,991948
5	17	58	0	122	6,9	6,444444	6,602254
6	17	59	0	116	6,7	6,555556	2,155887
7	17	59	0	87	6,8	6,555556	3,594771
8	17	59	0	28	6,6	6,555556	0,673401
Эксперимент						Теория	Отклонение

Результаты верификации оцениваются путём расчёта отклонения теоретического значения момента от экспериментального по формуле:

$$\Delta = \frac{|M_т - M_э|}{M_э} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Оценка значений отклонений позволяет сделать вывод о применимости предлагаемой энергетической математической модели и непротиворечивости теории рабочего процесса блока передачи мощности эксперименту.

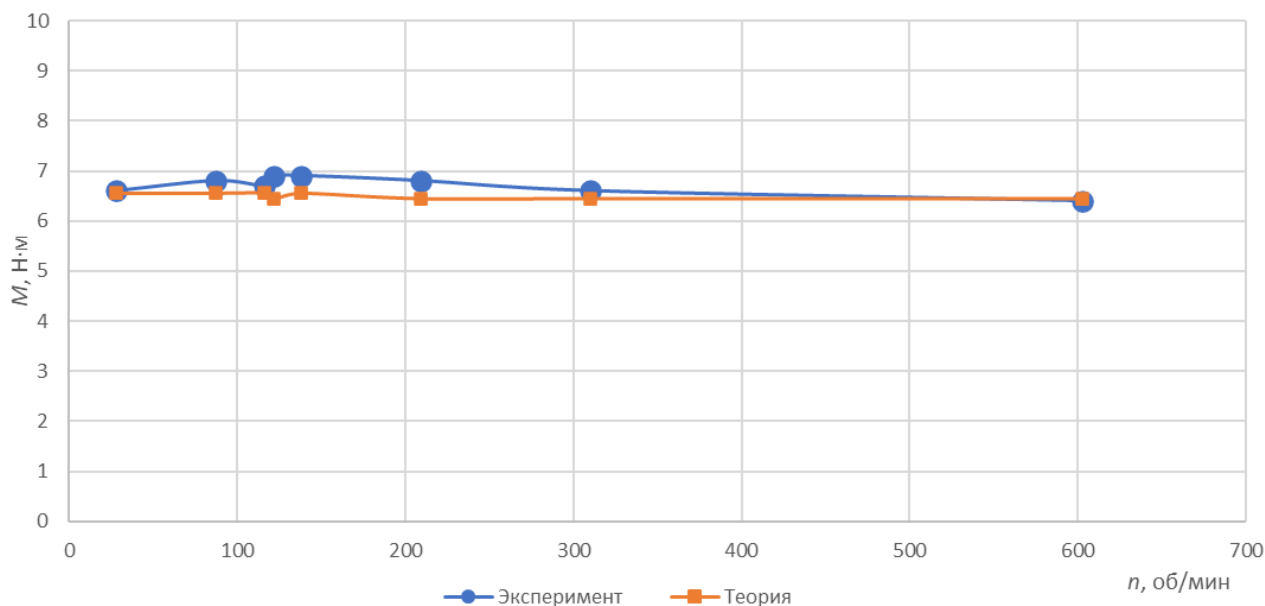


Рисунок 6 – Экспериментальная и теоретическая характеристика блока передачи мощности при постоянном давлении питания

Заключение

1. Сравнение момента и частоты вращения энергетической математической модели авиационного блока передачи мощности с результатами экспериментальных исследований показывает отклонение не более 5% для переменного давления питания (точки 1–4 таблицы 2), отклонение не более 5% для работы регулятора постоянного давления гидромотора (точки 6–10 таблицы 2) и отклонение не более 7% для постоянного давления питания (таблица 3), что позволяет сделать вывод о непротиворечивости и достаточной достоверности предлагаемой математической модели.

2. Качественный анализ энергетической математической модели позволяет отнести её к статическим математическим моделям гидравлических агрегатов, в отличие от предлагаемых в литературе [7, 8, 9] динамических моделей авиационного блока передачи мощности с различными регуляторами.

3. Применение энергетической модели авиационного блока передачи мощности позволит спроектировать и рассчитать статические характеристики перспективных блоков передачи мощности [10].

Список использованных источников

1. Техническое обслуживание гидросистемы самолета ТУ-154: Методические указания к практической работе / составитель В.П. Показеев. – Самара: Самарск. гос. аэрокос. ун-т., 2002. – 48 с.
2. Самолёт Ил-76ТД: инструкция по технической эксплуатации ч. III гл. 33. Гидравлическая система. – Москва: КБ Ильюшина, 1978. – 224 с.
3. Патент 2 455 197 Российская Федерация, МПК В64С 13/36. Гидравлическая система самолёта № 2010147306/11: заявлено 22.11.2010; опубликовано 10.07.2012 / С. Г. Кривой, С. А. Панин, А. В. Кубасов, А. В. Пименов; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество «Гражданские самолёты Сухого», Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – 15 с.
4. Поляков, Н. А. Концепция развития блоков передачи мощности в гидросистеме гражданского самолёта / Н. А. Поляков, А. А. Соловьёва, В. А. Целищев // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2021. – №67. – С. 5-15. DOI: 10.15593/2224-9982/2021.67.01

5. Proportional Directional Control Valves A01_Cat2500.indd, ddp, 04/19 A47 Parker Hannifin Corporation Hydraulic Valve Division Elyria, Ohio, USA A Technical Information Series D*1FB. – 2018.

6. Vickers® Constant Pressure Reversible Power Transfer Unit. Part Number 971600 Model MPHV3-115-1C. – 2013. p. 4.

7. Кудерко, Д. А. Высокооборотный блок передачи мощности с гидромеханическим регулированием / Д. А. Кудерко, Н. А. Поляков, Г. К. Фролов, В. А. Целищев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2024. – №76. – С. 30-40. DOI: 10.15593/2224-9982/2024.76.03

8. Целищев, В. А. Коррекция работы аварийного гидравлического привода выпуска шасси самолета / В. А. Целищев, Г. К. Фролов, Д. А. Кудерко, Н. А. Поляков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2023. – №74. – С. 51-62. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.05

9. Поляков, Н. А. Регулятор постоянной мощности объемной гидромашины в блоке передачи мощности гражданского самолета / Н. А. Поляков, Д. А. Кудерко, В. А. Целищев // Вестник УГАТУ. – 2023. – Том 27, №3 (101). – С. 3-13.

10. Патент 2 812 955 Российская Федерация, МПК F15B 15/18. Блок передачи мощности гидравлической системы самолёта №2023116704: заявлено 26.06.2023: опубликовано 06.02.2024 / С. Ю. Константинов, Д. А. Кудерко, Д. Ф. Мукминов, Н. А. Поляков, В. А. Целищев; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий». – 6 с.

Energy mathematical model of an aircraft power transfer unit

S. Y. Konstantinov	Candidate of Science(Engineering), Associate Professor of the Department of the Applied Hydromechanics; Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation; email: konstserge@mail.ru
D. A. Kuderko	Candidate of Science(Engineering), Director of Design Center, JSC “Technodinamika”; Holding «Technodinamika», Moscow, Russian Federation; email: dm_kuderko@mail.ru
N. A. Polykov	Deputy Director of Design Center, JSC “Technodinamika”; Holding «Technodinamika», Moscow, Russian Federation; email: polyakovna@tdhc.ru
V. A. Tselishev	Doctor of Science(Engineering), Professor, Head of the Department of the Applied Hydromechanics; Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation; email: pgl.ugatu@mail.ru

The article proposes an energy mathematical model of an aircraft power transmission unit, as well as the results of experimental studies of a model power transmission unit at the “Diagnostics and Identification of Hydraulic Systems” stand of the Department of Applied Fluid Mechanics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education UUNiT. The proposed mathematical model was verified with experiment, showing good consistency and sufficient reliability. The energy model of the data transmission unit is compared with existing and evaluated predictions for its application.

Keywords: power transfer unit; PTU; pump; hydraulic motor; mathematical model PTU; PTU testing

Citation: Konstantinov, S. Y., Kuderko, D. A., Polykov, N. A. and Tselishev, V. A. (2025), “Energy mathematical model of an aircraft power transfer unit”, *Journal of Dynamics and Vibroacoustics*, T. 11, no. 1, pp. 51-61. DOI: 10.18287/2409-4579-2025-11-1-51-61. (In Russian; abstract in English)

References

1. Pokazeev, V. P. (2002), *Tekhnicheskoe obsluzhivanie gidrosistemy samoleta TU-154: Metodicheskie ukazaniya k prakticheskoy rabote* [Maintenance of the hydraulic system of the TU-154 aircraft: Guidelines for practical work], Samarsk. gos. aerokos. univ-t., Samara. (in Russian)
2. *Samolet Il-76TD: instruktsiya po tekhnicheskoy ekspluatatsii ch. III gl. 33. Gidravlicheskaya sistema* [Aircraft Il-76TD: technical operation manual, part III, chapter 33. Hydraulic system] (1978), KB Il'yushina, Moscow. (in Russian)
3. Krivoy, S. G., Panin, S. A., Kubasov, A. V. and Pimenov, A. V. (2012), *Gidravlicheskaya sistema samoleta №2010147306/11* [Aircraft hydraulic system №2010147306/11], Zakrytoe aktsionernoe obshchestvo «Grazhdanskie samolety Sukhogo», Ministerstvo promyshlennosti i trgovli Rossiyskoy Federatsii (2012),.: declared 22.11.2010: published 10.07.2012, RU 2 455 197 C1. (in Russian)
4. Polyakov, N. A., Solov'eva, A. A. and Tselishev, V. A. (2021), “Concept of development of power transmission units in the hydraulic system of a civil aircraft”, *Vestnik PNIPU. Aerospace engineering*, №67, pp. 5-15. DOI: 10.15593/2224-9982/2021.67.01. (in Russian)
5. Proportional Directional Control Valves A01_Cat2500.indd, ddp, 04/19 A47 (2018), Parker Hannifin Corporation Hydraulic Valve Division Elyria, Ohio, USA A Technical Information Series D*1FB.

6. Vickers® Constant Pressure Reversible Power Transfer Unit (2013), Part Number 971600 Model MPHV3-115-1C.
7. Kuderko, D. A., Polyakov, N. A., Frolov, G. K. and Tselishchev, V. A. (2024), “High-speed power transmission unit with hydromechanical regulation”, *Vestnik PNIPU. Aerospace engineering*, №76, pp. 30–40. DOI: 10.15593/2224-9982/2024.76.03. (in Russian)
8. Kuderko, D. A., Polyakov, N. A., Frolov, G. K. and Tselishchev, V. A. (2023), “Correction of the operation of the emergency hydraulic drive for releasing the aircraft landing gear”, *Vestnik PNIPU. Aerospace engineering*, №74, pp.51–62. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.74.05. (in Russian)
9. Kuderko, D. A., Polyakov, N. A. and Tselishchev, V. A. (2023), “Constant power regulator of a volumetric hydraulic machine in a power transmission unit of a civil aircraft”, *Vestnik USATU*, vol. 27, №3 (101), pp. 3-13. (in Russian)
10. Konstantinov, S. Yu., Kuderko, D. A., Mukminov, D. F., Polyakov, N. A. and Tselishchev, V. A. (2024), *Blok peredachi moshchnosti gidravlicheskoj sistemy samoleta №2023116704* [Aircraft hydraulic power transmission unit №2023116704], Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Ufimskiy universitet nauki i tekhnologii», filed 06/26/2023, published 02/06/2024, RU 2 812 955 C1. (in Russian)