

П.М. АНДРЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»;
Р.Ю. БЛОШЕНКО, магістрант, НТУ «ХПІ»

РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ В ГІДРАВЛІЧНІЙ ГАЛЬМІВНІЙ СИСТЕМІ ЛІТАКА У РЕЖИМІ ГАЛЬМУВАННЯ

На основі загальних рівнянь механіки та гідромеханіки запропоновано узагальнену математичну модель робочого процесу гідравлічної системи. Сформульовані припущення, що прийняті при її розробці. Наведено опис роботи та результати розрахункових досліджень робочого процесу гальмівної системи літака у режимі гальмування. Встановлено раціональний закон переміщення запірно-регулюючого елемента клапана.

Ключові слова: математична модель, гідравлічна система, робочий процес, клапан, запірно-регулюючий елемент.

Вступ і постановка проблеми. Гідравлічні системи завдяки своїм відомим перевагам, таким як мала вага та габарити на одиницю потужності, плавність регулювання швидкістю виконавчих механізмів, висока надійність тощо, знайшли широке застосування в системах керування сучасних літальних апаратів. Для таких систем надзвичайно актуальною є задача поліпшення характеристик виконавчих механізмів при одночасному збереженні їх високої надійності. Одним з ефективних напрямків вирішення цієї задачі є застосування, при побудові таких систем, гідроапаратів з поліпшеними робочими характеристиками.

Редукційний клапан з механічним керуванням є одним з основних гідравлічних апаратів гальмівної системи літака. Його вихідні характеристики значною мірою визначають характеристики гальмівної системи в цілому. Нами було удосконалено конструкцію редукційного клапана, відмінною особливістю якого є те, що його запірно-регулюючий елемент (ЗРЕ) виконано з трьох частин – штока, поршня та саме ЗРЕ, рис. 1. Слід зазначити, що при проектуванні гідравлічних систем та елементів широкі можливості відкриваються при використанні сучасних методів математичного моделювання з використанням прикладних програм, які базуються на математичних моделях їх робочих процесів.

Розрахунку та проектуванню таких систем та елементів, розробці математичних моделей їх робочих процесів присвячені роботи *Бауми Т.М., Гамініна Н.С., Абрамова Е.И., Зайончковського Г.Й., Лур'є З.Я., Raymonda E.T.* [1 – 5] й інших. Однак в даних роботах не розглядається гальмівна система літака з удосконаленим редукційним клапаном. В статті [6] наведена, розроблена нами, математична модель робочого процесу удосконаленого редук-

ційного клапана, а в статті [7] – гідравлічної гальмівної системи літака. Відмінною особливістю розроблених математичних моделей є те, що вони комплексно враховують нестационарні гідродинамічні процеси, змінність параметрів робочої рідини (РР) та коефіцієнта витрат. Однак в розглянутих математичних моделях гідравлічних систем та апаратів розглядаються лише конкретні конструктивні рішення. Аналіз науково-технічної літератури виявив, що відсутні єдині підходи щодо до розроблення математичних моделей гідравлічних систем та апаратів. Ряд припущень, які приймаються при їх розробці, не цілком обґрунтовані. Відсутня також інформація щодо дослідження впливу параметрів редукційного клапана на робочі характеристики гальмівної системи літака. В зв'язку з вищевикладеним нами була поставлена задача, виходячи з єдиних методологічних принципів, розробити узагальнену математичну модель гідравлічної системи та дослідити вплив параметрів редукційного клапана на робочі характеристики гальмівної системи літака.

Узагальнена математична модель гідравлічної системи. Зазвичай при розробленні таких моделей приймають наступні припущення: корпусу гідроапаратів та магістралі – абсолютно жорсткі, а їх пружні властивості враховуються модулем об'ємної пружності РР; пружини працюють в межах, де їх характеристики лінійні та не відбувається відрив їх кінців від поверхонь контакту; початковими ділянками трубопроводів та каналів нехтують; у гідравлічній системі відсутні витоки, кавітація, гідравлічний удар і виконується умова нерозривності РР; швидкість звуку в РР є сталою та значно більшою за швидкість руху РР; РР – *ньютонівська*, а її течія – ізоермічна. Проводять декомпозицію гідравлічної системи та у залежності від конструктивних рішень окремих елементів розробляють їх математичні моделі. Для пришвидшення розробки яких нами пропонується використовувати узагальнену математичну модель.

Узагальнена математична модель гідравлічного елемента містить наступні співвідношення:

– *рівняння руху рухомих елементів*

$$m_{pe} \ddot{x}_{pe} = F_{кер}(t) - F_{\Delta p}(t) - F_{пр\Sigma}(t) - F_{гд}(t) - F_{тр}(t); \quad (1)$$

– *рівняння нерозривності*

$$q_{гс}(t) = q_1(t) + q_{ст}(t) + q_{пер}(t); \quad (2)$$

– *витрати через місцеві опори та канали*

$$q(t) = f(Re, A, \Delta p, \rho, t); \quad (3)$$

– *формули обмеження переміщення рухомих елементів*

$$0 < x_{pe}(t) \leq x_{pe\max}; \quad (4)$$

– *рівняння зміни стану РР*

$$T_a = const, \quad \rho(t) = f(p, T_a, t). \quad (5)$$

У співвідношеннях (1) – (5) m_{pe} – це маса рухомих елементів; t – час; $x_{pe}(t)$ і $x_{pe\ max}$ – відповідно переміщення рухомих елементів і його максимальне значення; $F_{кер}(t)$, $F_{\Delta p}(t)$, $F_{пр\Sigma}(t)$, $F_{гд}(t)$ і $F_{тр}(t)$ – відповідно сили керування, перепаду тиску на рухомому елементі, сумарна сила пружин, гідродинамічна сила і сила тертя; p і Δp – відповідно тиск і перепад тиску; $q_{гс}(t)$, $q_1(t)$, $q_{ст}(t)$ і $q_{пер}(t)$ – відповідно витрата в гідросистемі, виконавчому механізмі, стиску РР і при перетіканні; Re – число Рейнольдса; A – площа щілини, отвору або каналу; ρ – густина РР; T_a – абсолютна температура.

Зазвичай температуру T_a приймали рівною її середньому значенню, а густину РР $\rho(t)$ визначають залежно від її газовмісту та зміни тиску в гальмівній системі літака за залежністю з статті [8].

Зазначимо, що розрахунок сил, які входять до рівняння (1), проводять у відповідності до конструктивної схеми елемента за відомими з літературних джерел аналітичними залежностями, наприклад роботи [9].

Математичну модель гідравлічної системи отримують поєднуючи математичні моделі окремих її елементів з математичними моделями трубопроводів та каналів. Для цього можна використовувати їх математичні моделі у зосереджених параметрах, за Т- чи Г-подібними схемами [10].

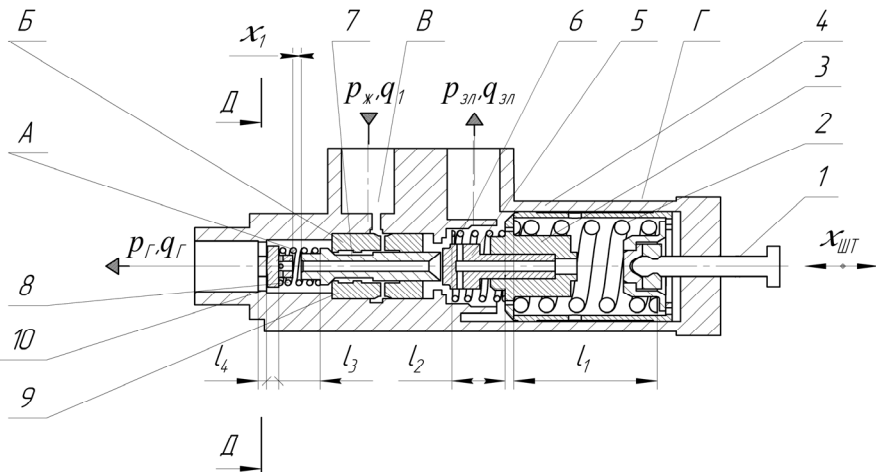


Рис. 1 – Розрахункова схема редукційного клапана:

- 1 – шток; 2, 6, 8 – пружини; 3 – поршень; 4 – корпус 5 – зливний клапан; 7 – ЗРЕ;
9 – втулка; 10 – вихідна шайба.

Розрахункові дослідження гальмівної системи літака. Розглядали режим гальмування, коли човник блоку захисту знаходиться в положенні,

при якому магістраль аварійного гальмування закрита; закриті також антиюзкові автомати і через них не відбувається злив РР в бак. Тиск в гальмівну гідросистему надходить з лінії живлення $p_{ж}$. Основне гальмування коліс літака здійснюється натисканням на педаль керування редукційного клапана. При цьому шток 1 зміщується, згідно з рис. 1, вліво, стискає пружину 2, яка опирається на поршень 3, що разом з зливним клапаном 5, також зміщується вліво. Зливний клапан 5 закриває розвантажувальний канал, виконаний в ЗРЕ 7. Далі шток з поршнем та ЗРЕ зміщуються вліво. РР крізь щілину, утворену ЗРЕ та втулкою 9, починає надходити до гальмівної магістралі. З гальмівної магістралі коліс РР через антиюзкові автомати надходить на вхід човникових клапанів і далі у гідроциліндри гальмування, як наслідок, відбувається гальмування коліс.

В міру надходження РР до гальмівної магістралі, тиск під ЗРЕ та клапаном 5 починає зростати. Пружина 8 починає стискатися. При досягненні заданого тиску в гальмівній магістралі, ЗРЕ під дією пружини 8 закриває щілину, утворену їм та втулкою. Цим зупиняється підвищення тиску в гальмівній магістралі та надходження РР до гідроциліндрів гальмування коліс. Колеса починають гальмуватися з постійним гальмівним моментом.

Зазначимо, що при розгальмовуванні коліс літака педалі керування займають вихідну позицію. Редукційні клапани через зворотні клапани з'єднані зі зливом. РР з циліндрів гальмування коліс через човникові клапани надходить у вихідні отвори антиюзкових автоматів і далі через зворотний клапан та гідорозподільник зливається в бак.

При дослідженні робочих процесів використовували розроблену нами математичну модель гальмівної система літака та редукційного клапана [6, 7]. При цьому вважали, що використовуються трубопроводи великого діаметру, а процеси, що в них відбуваються, описуються без врахування розподілу параметрів РР по довжині. Це дозволило не розглядати хвильові процеси. Вважали, що виконавчим механізмом гідросистеми є одноштоковий гідроциліндр з внутрішнім діаметром 100 мм, діаметром штока 50 мм та ходом 250 мм. В якості РР використовували масло АМГ-10 при постійній температурі, рівній 60°C, з газовмістом, рівним 0,8 %. Задавали геометричні розміри елементів системи, жорсткості пружин редукційного клапана: $c_{пр2} = 13,3$ Н/мм, $c_{пр6} = 1,33$ Н/м, $c_{пр8} = 2,66$ Н/м, навантаження на вихідній ланці – гідроциліндрі, $p_{ж} = 9,0$ МПа, $p_{зл} = 0,5$ МПа, характер зміни $x_{шт}(t)$. За початкові умови приймали:

$$x_{шт1}(0) = 0; \quad x_{шт2}(0) = 0; \quad x_{ЗРЕ}(0) = 0; \quad \dot{x}_{шт1}(0) = 0; \quad \dot{x}_{шт2}(0) = 0; \quad \dot{x}_{ЗРЕ}(0) = 0.$$

Зазначимо, що величина тиску в гальмівній системі в усталеному режимі відповідає навантаженню на гальмах, що трансформується витратою навантаження, а витрата – обумовлена витоками.

Розрахункові дослідження гальмівної системи літака проводили за допомогою пакета прикладних програм Mathcad та розробленої програми. Досліджували вплив характеру зміни переміщення ЗРЕ, а також зазору між втулкою та ЗРЕ редукційного клапана на робочі характеристики гідросистеми в процесі гальмування. Приймали, що переміщення штока та ЗРЕ редукційного клапана відбувається ступінчато або за лінійною залежністю чи за експонентою, а зазор між втулкою та ЗРЕ клапана відповідно становить: 0,7 мм; 0,2 мм; 1,2 мм. При заданих початкових умовах на комп'ютері за допомогою зазначеного пакета прикладних програм отримали графіки перехідних процесів у редукційному клапані та гальмівній системі літака, рис. 2 – 3.

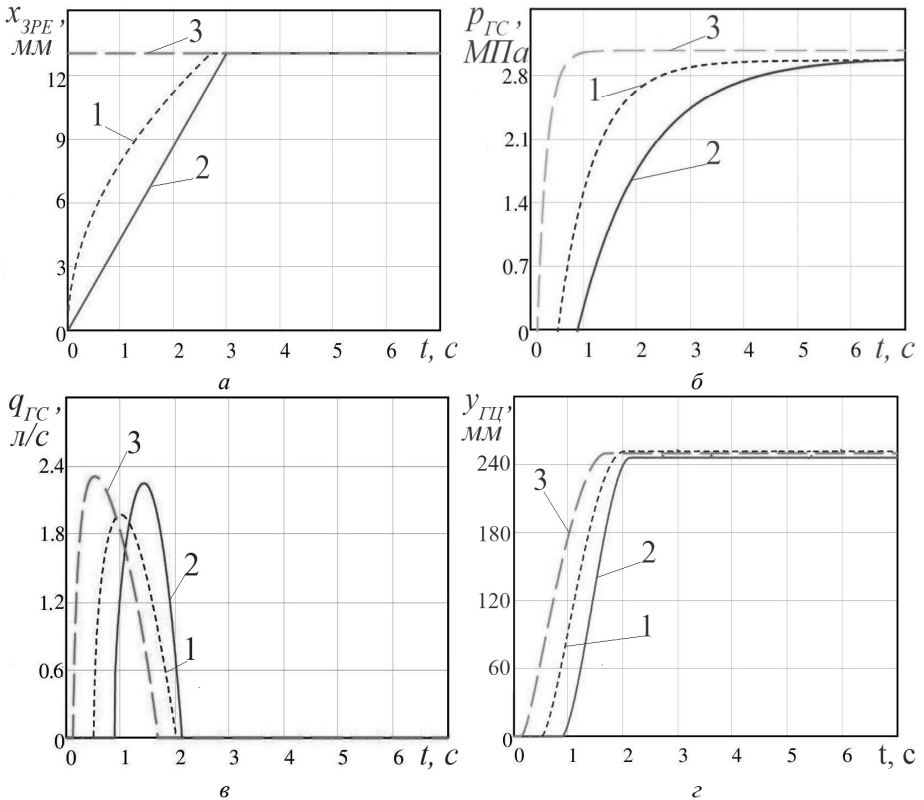


Рис. 2 – Графіки перехідних процесів у редукційному клапані та гальмівній системі літака: 1, 2 і 3 – відповідно при переміщенні штока та ЗРЕ редукційного клапана за експонентою, лінійною залежністю і ступінчато: а – переміщення штока та ЗРЕ редукційного клапана; б і в – тиску і витрати у гальмівній системі; г – переміщення штока гідроциліндра.

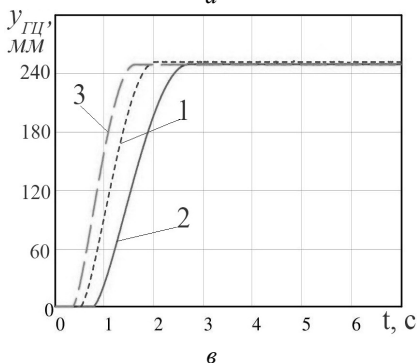
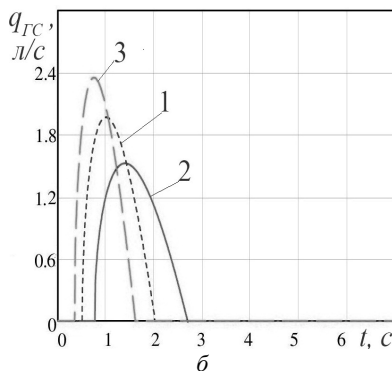
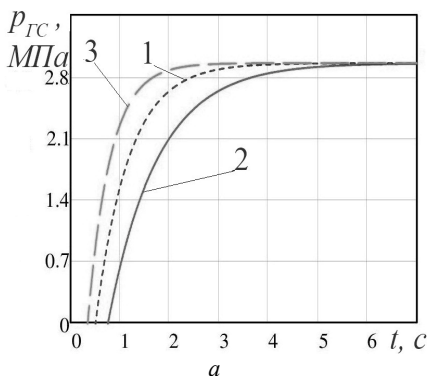


Рис. 3 – Графіки перехідних процесів у редукційному клапані та гальмівній системі літака при переміщенні штока та ЗРЕ редукційного клапана за експонентою:

1, 2 і 3 – відповідно при зазорі між втулкою та ЗРЕ редукційного клапана рівним – 0,7 мм, 0,2мм і 1,2 мм:

a і $б$ – графіки тиску і витрати у гальмівній системі; $в$ – переміщення штока гідроциліндра.

У результаті проведених розрахункових досліджень робочого процесу гальмівної системи літака у режимі гальмування визначено, що найбільш раціональним є переміщення ЗРЕ редукційного клапана за експонентою. Воно забезпечує плавне переміщення виконавчого гідроциліндра та малий час спрацювання, при переміщенні штока та ЗРЕ редукційного клапана за експонентою, лінійною залежністю і ступінчасто час спрацювання виконавчого гідроциліндра відповідно становить 2 с; 2,1 с і 1,6 с. При збільшенні зазору між втулкою та ЗРЕ редукційного клапана час спрацювання виконавчого гідроциліндра зменшується на 16 %, а при зменшенні – збільшується на 24 %.

Стиском РР при проведенні розрахункових досліджень можна знехтувати, так як його значення виявилися на два порядки менше ніж величини витоків.

Висновки. Запропоновано узагальнену математичну модель гідравлічної системи, використання якої дозволить пришвидшити розробку математичних моделей робочого процесу таких систем.

У результаті проведених розрахункових досліджень робочого процесу гальмівної системи літака у режимі гальмування встановлено, що найбільш

раціональним є переміщення штока та ЗРЕ редукційного клапана за експонентою. Воно забезпечує плавне переміщення виконавчого гідроциліндра та малий час спрацювання. При збільшенні зазору між втулкою та ЗРЕ редукційного клапана час спрацювання виконавчого гідроциліндра зменшується, а при зменшенні – збільшується.

Розроблена математична модель та програма дозволяють проаналізувати вплив геометричних параметрів редукційного клапана на робочі характеристики гальмівної системи літака, встановити їх раціональні значення.

Список літератури: 1. *Башта Т.М.* Гидравлический привод летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1967. – 495 с. 2. *Гамынин Н.С.* Гидравлический привод систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. – 376 с. 3. *Абрамов Е.І., Зайончковський Г.Й.* Проектування систем керування літальних апаратів. – К.: НАУ, 2005. – 188 с. 4. *Лурье З.Я., И.А. Солдатенков И.А., Лищенко И.Г.* Динамические характеристики линеаризованной модели следящего рулевого привода // Промислова гідраліка і пневматика. – 2008. – № 3 (21). – С. 51 – 55. 5. *Raymond E.T., Chenoweth C.C.* Aircraft Flight Control Actuation System Design: Published Societu of Automotive Engineers Inc. – Warren dale, USA, 1993. – 242 p. 6. *Андренко П.М., Свинарченко М.С., Блошенко Р.Ю.* Робочий процес редукційного клапана гальмівної системи літака // Вісник НТУ “ХПІ”. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2012. – № 27. – С. 11 – 17. 7. *Андренко П.М., Клітний В.В., Блошенко Р.Ю.* Робочий процес гідралічної гальмівної системи літака в режимі гальмування // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2012. – № 1. – С. 7 – 15. 8. *Лурье З., Федоренко И.* Исследование рабочего процесса мехатронного гидроагрегата системы смазки металлургического оборудования с учетом характеристик двухфазной жидкости // MOTROL: Commission of motorization and energetics in agriculture: Polish Academy of sciences. – Lublin. – 2010. – Vol. 12. – С. 10 – 25. 9. *Лурье З.Я., Андренко П.Н.* Метод расчета гидродинамической силы на осциллирующем запорно-регулирующем элементе гидроаппарата / Гидропневмосистемы мобильных и технологических машин: междунар. науч.-технич. конф., 17-19 ноябр. 2010 г.: сборник докладов. – Минск, БНТУ, 2010. С. 47 – 53. 10. *Скляревский О.М.* Об’ємний гідропривід: [навч. посіб.] – Запоріжжя: ЗНТУ, 2001. – 212 с.

Надійшла до редколегії 20.05.2013

УДК 621.226

Розрахункові дослідження робочого процесу в гідравлічній гальмівній системі літака у режимі гальмування / П. М. Андренко, Р. Ю. Блошенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2013. – №37 (1010). – С. 3 – 9. Бібліогр.: 10 назв.

На основе общих уравнений механики и гидромеханики предложена обобщенная математическая модель рабочего процесса гидравлической системы. Сформулированы допущения, принятые при ее разработке. Приведено описание работы и результаты расчетных исследований рабочего процесса тормозной системы самолета в режиме торможения. Установлен рациональный закон перемещения запорно-регулирующего элемента клапана.

Ключевые слова: математическая модель, гидравлическая система, рабочий процесс, клапан, запорно-регулирующий элемент.

On the basis of the general equations of mechanics and fluid mechanics proposed generalized mathematical model of the hydraulic system workflow. Formulated assumptions made in its development. The description of the work and the results of computational research workflow braking system of the aircraft during braking. Set a rational law of displacement shutoff valve member.

Key words: mathematical model, hydraulic system, workflow, valve, globe control element.