

Ю.А. Буренніков, канд. техн. наук,

Л.Г. Козлов, канд. техн. наук,

С.В. Репінський, О.В. Поліщук

Вінницький національний технічний університет

## ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО РЕГУЛЯТОРА ПОДАЧІ АКСІАЛЬНО-ПОРШНЕВОГО РЕГУЛЬОВАНОГО НАСОСА

*Представлена схема системы управления аксиально-поршневого регулируемого насоса с профилированным окном золотника комбинированного регулятора подачи, что обеспечивает работу насоса в режимах стабилизации подачи и постоянной мощности. На основе усовершенствованного критерия оптимизации, который комплексно учитывает статические и динамические характеристики системы управления аксиально-поршневого регулируемого насоса в режимах стабилизации подачи и постоянной мощности, методом ЛП-поиска найдено оптимальное сочетание конструктивных параметров комбинированного регулятора.*

*The paper presents a control system circuit of the axial-piston variable pump with a profiled port of the combined flow regulator that provides pump operation in the flow stabilization and constant power modes. On the basis of the refined optimization criterion, that takes into account static and dynamic characteristics of axial-piston variable pump control system in the flow stabilization and constant power modes, optimal set of the combined regulator design parameters was found by means of LP method.*

### Вступ

Тенденція широкого застосування аксіально-поршневих регульованих насосів (АПН) пояснюється прагненням споживачів гідроустаткування до розширення функціональних можливостей, реалізації режимів енергозбереження і оптимального використання потужності двигуна при виконанні робочих процесів. Технічні характеристики та функціональні можливості регульованого АПН багато в чому залежать від регулятора подачі, що входить до системи керування робочим об'ємом АПН [1, 4]. При проектуванні регулятора подачі вплив його конструктивних параметрів на статичні, динамічні та енергетичні характеристики системи керування регульованого АПН в різних режимах може бути неоднозначний. Зміна параметрів для покращення одних характеристик може супроводжуватися одночасним погіршенням інших.

Таким чином, вибір значень параметрів, які задовольняють всі вимоги, що висуваються до системи керування регульованого АПН, є досить складним завданням. Вирішення задачі вибору параметрів комбінованого регулятора у даному випадку можна забезпечити за рахунок використання методів оптимізації. Серед широкого кола методів оптимізації подібних задач вибраний метод ЛП-пошуку [2], як ефективний метод знаходження оптимальних значень в задачах з багатьма умовами. Метод ЛП-пошуку також є універсальним інструментом, оскільки на його основі можна створювати власний критерій оптимізації, який включає декілька показників в залежності від складності прикладної задачі.

### Основні результати досліджень

На рисунку 1 показано схему системи керування регульованого АПН з комбінованим регулятором подачі, яка забезпечує статичну характеристику аксіально-поршневого насоса в режимі стабілізації подачі та статичну характеристику гіперболічного типу в режимі постійної потужності за рахунок форми профільованого вікна золотника регулятора.

Схема містить регульований АПН 1, пропорційний розподільник 7 з пристроєм відстеження тиску навантаження споживачів ( $LS$ -сигналу), регулятор подачі 8 з золотником 9 та пружиною 10, який підключений до гідролінії 3 і 15 та забезпечує режим стабілізації подачі АПН, керуючи потоком, що надходить з гідролінії 3 в циліндр керування 4. Планшайба 2 насоса знаходиться під впливом дії циліндрів 4, 5 і пружини 6. На злив з циліндра керування 4 встановлено дросель 14. Регулятор потужності 11 з золотником 12 і пружиною 13 змінює робочий об'єм насоса за робочим тиском таким чином, що забезпечується режим постійної потужності АПН.

Система керування працює таким чином. При відключених споживачах лінія керування 15 регулятора з'єднується зі зливом, тиск в ній практично відсутній. Потік, створений насосом, переміщує золотник 9 вправо, стискаючи пружину 10, і потрапляє в циліндр керування 4. Створений в циліндрі тиск  $P_{Ц}$  перемістить планшайбу таким чином, що потік насоса буде мінімальним і компенсуватиме тільки витоки в системі керування і гідроприводі.

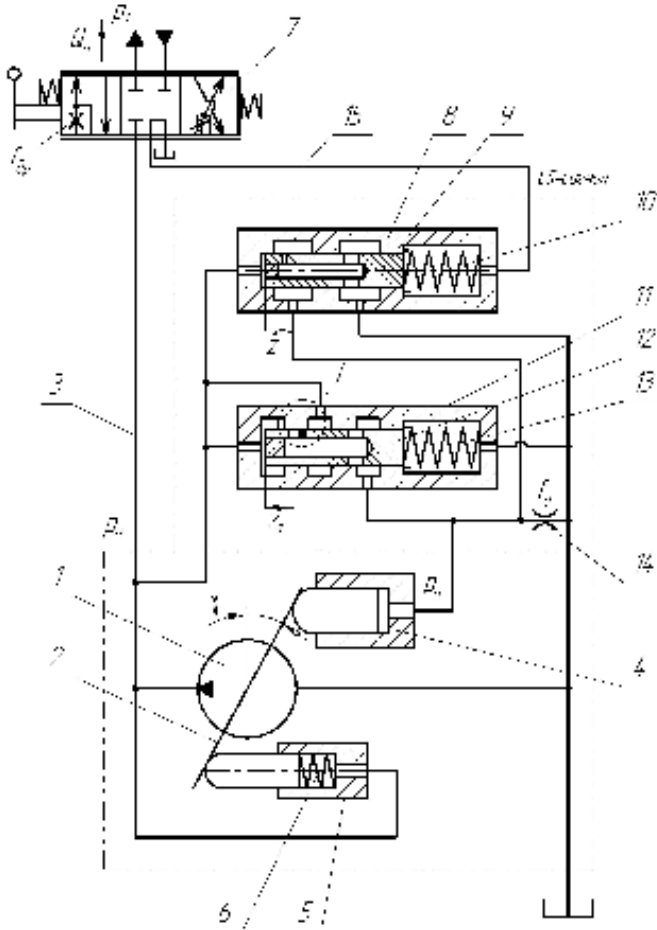


Рисунок 1 — Схема системи керування регульованого аксіально-поршневого насоса з комбінованим регулятором подачі.

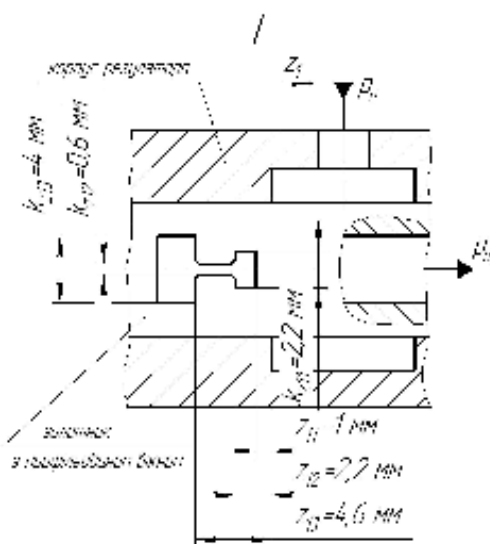


Рисунок 2 — Профільоване вікно золотника комбінованого регулятора подачі.

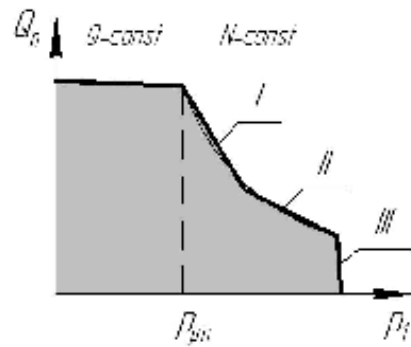


Рисунок 3 — Статична характеристика регульованого аксіально-поршневого насоса.

В усталеному робочому режимі тиски  $p_H$  і  $p_1$ , а також зусилля пружини 10, впливаючи на золотник 9, визначають таке його положення, при якому тиск  $p_{Ц}$  в циліндрі 4 урівноважує на планшайбі 2 момент, створений тиском  $p_H$  в циліндрі 5 разом з пружиною 6. Пружина 10 підбирається таким чином, щоб могла підтримувати постійний перепад тиску  $\Delta p_{LS} = p_H - p_1$  на робочому вікні пропорційного розподільника 7. Будь-яка зміна  $\Delta p_{LS}$  зумовлює відповідну зміну кута нахилу  $\gamma$ , спрямовану у бік зменшення помилки. Так, наприклад, при збільшенні  $\Delta p_{LS}$  золотник 9 регулятора подачі 8 зміститься вправо, збільшиться потік до циліндра 4 і кут  $\gamma$  зменшиться доти, поки  $\Delta p_{LS}$  не досягне заданого значення. Змінюючи пропорційним розподільником 7 площу робочого вікна  $f_{op}$ , можна змінювати величину подачі  $Q_n$  до споживачів.

При значному збільшенні величини тиску  $p_H$  спрацьовує регулятор потужності 11. Підвищення тиску  $p_H$ , що діє на лівий торець золотника 12, зміщує останній вправо, стискає пружину 13 і відкриває профільоване робоче вікно золотника (рисунок 2), яке визначає потік  $Q_{Ц1}$  до циліндра керування 4 в залежності від координати  $z_1$  переміщення золотника. В циліндрі керування 4 створюється тиск  $p_{Ц}$ , який визначає кут нахилу  $\gamma$  планшайби 2 насоса і змінює робочий об'єм насоса за тиском таким чином, що забезпечується постійність добутку тиску і подачі насоса і, тим самим, забезпечується стабільність приводної потужності.

Графік статичної характеристики регульованого АПН з комбінованим регулятором подачі показано на рисунку 3. Наявність профільованого вікна в золотнику 12 регулятора потужності 11 (рисунок 2) і, відповідно, змінного коефіцієнта підсилення вікна золотника  $k_{z1}$  у залежності від переміщення золотника  $z_1$ , забезпечує на статичній характеристиці дві ділянки, які наближають сумарну характеристику до гіперболічної кривої, що характеризує роботу насоса у режимі постійної потужності. Ділянка I забезпечується відкриттям робочого вікна золотника регулятора потужності з коефіцієнтом підсилення  $k_{z11}$  при переміщенні золотника  $z_{11} < z_1 \leq z_{12}$ . Ділянка II при переміщенні  $z_1$  більше  $z_{12}$  забезпечується одночасним

Таблиця 1

Вплив основних параметрів комбінованого регулятора подачі на статичні та динамічні характеристики системи керування регульованого АПН

Параметри комбінованого регулятора	Значення (діапазон зміни)	Одиниця вимірювання	Вплив на статичні характеристики $\delta$	Вплив на динамічні характеристики			
				стійкість	$t_p$	$k$	$\sigma$
$d_p$	$(4,0-10,0) \cdot 10^{-3}$	$m$	↓	↓	↑	↑	↑
$d_{p1}$	$(4,0-10,0) \cdot 10^{-3}$	$m$	—	↓	↑	↑	↑
$c_p$	$(0,8-4,0) \cdot 10^4$	$H/m$	↓	—	↓	↓	↓
$c_{p1}$	$(3,0-10,0) \cdot 10^4$	$H/m$	—	—	↓	↓	↓
$k_Z$	$(0,5-4,0) \cdot 10^{-3}$	$m$	↓	↑	↓	↓	↓
$k_{Z1}$	$(0,25-4,0) \cdot 10^{-3}$	$m$	—	↓	↑	↑	↑
$b_p$	5-500	$H \cdot c/m$	0	↓	↑	↑	↑
$b_{p1}$	5-500	$H \cdot c/m$	0	↑	0	0	^
$f_0$	в реж. стабіл. подачі	$m^2$	0	↓	↑	↑	↑
	в реж. пост. потужності		0	↑	↑	↑	↑

Примітка. „0” — не впливає; „—” — не досліджувалося; „↑” — покращує; „↓” — погіршує.

відкриттям робочого вікна величиною

$$f_1(z_1) = (z_{12} - z_{11}) \cdot k_{Z11}$$

і відкриттям робочого вікна з коефіцієнтом підсилення  $k_{Z12}$ . Обмеження максимального тиску здійснюється за рахунок  $k_{Z13}$  при переміщенні  $z_1$  більше  $z_{13}$  (ділянка III).

Для дослідження процесів у системі керування регульованого АПН розроблено математичну модель [5-7], що включає рівняння нерозривності потоків; рівняння моментів, що діють на планшайбу регульованого АПН; рівняння сил, що діють на золотники комбінованого регулятора подачі, а також уточнені, отримані експериментально залежності моменту опору планшайби регульованого насоса і витрати через профільоване робоче вікно золотника. Розв'язання системи рівнянь математичної моделі виконувалося за допомогою програмного пакета MatLab Simulink.

Аналіз вимог, які висуваються до гідроприводів мобільних робочих машин і регуляторів подачі АПН [3-7] дозволяють сформулювати критерій оптимізації, що містить за рівнем рангу такі показники: в режимі стабілізації подачі — стійкість; похибка стабілізації подачі  $\delta$  до виконавчого гідродвигуна; час регулювання  $t_p$ ; перерегулювання  $\sigma$ ; в режимі постійної потужності — стійкість; час регулювання  $t_p$ ; перерегулювання  $\sigma$ .

Стійкість системи керування АПН повинна забезпечуватися як в режимі стабілізації подачі, так і в режимі постійної потужності.

Умови виконання деяких технологічних процесів вимагають, щоб величина похибки стабілізації потоку до споживача  $\delta$  була мінімальною. Інакше при перевищенні встановленого значення виникають помилки при відпрацюванні керівних сигналів, знижується точність машини. Допустима величина похибки стабілізації потоку  $\delta$  в режимі стабілізації подачі при несприятливих умовах роботи системи керування АПН не повинна перевищувати 6%.

Час регулювання  $t_p$  має бути мінімальним при несприятливих комбінаціях параметрів, що характеризують умови роботи системи керування АПН. Для забезпечення необхідної швидкодії час регулювання не повинен перевищувати 0,3 с.

Перерегулювання  $\sigma$  в системі керування АПН при несприятливих комбінаціях параметрів, які характеризують умови роботи, повинно складати не більше 30% за величиною  $P_H$ .

Критеріальні обмеження використовуються для вилучення з отриманої в подальшому послідовності сполучень параметрів оптимізації, що призвели до перевищення значень показників критерію оптимізації: нестійкої роботи,  $\delta > 6\%$ ,  $t_p > 0,3$  с і  $\sigma > 30\%$ .

Математичним моделюванням процесів у системі керування в режимах стабілізації подачі і постійної потужності регульованого АПН досліджено вплив параметрів комбінованого регулятора подачі на статичні, динамічні та енергетичні характеристики системи керування. В процесі досліджень виявлено найбільш впливові параметри і встановлено, що характер цього впливу неоднозначний. Зміна параметрів для покращення одних характеристик може супроводжуватися одночасним погіршенням інших.

Так, наприклад, дослідження енергетичних характеристик [6] свідчать, що підвищення гідравлічного ККД системи керування можливе за рахунок зменшення перепаду тиску  $\Delta p_{LS}$  на золотнику регулятора подачі, що, в свою чергу, супроводжується підвищенням похибки стабілізації подачі  $\delta$  до гідродвигуна. Встановлено [6], що компенсувати зазначений негативний вплив зменшення  $\Delta p_{LS}$  на  $\delta$  можна шляхом відповідного вибору конструктивних параметрів комбінованого регулятора (рисунок 4). Проте, необхідне змінювання параметрів комбінованого регулятора (збільшення діаметра золотника  $d_p$ , жорсткості пружини  $c_p$  і коефіцієнта підсилення робочого вікна  $k_Z$ ) неоднозначно впливає на динамічні характеристики системи керування. При збільшенні  $d_p$  погіршується стійкість і показники якості перехідного процесу — час регулювання  $t_p$ , коливальність  $k$  та перерегулювання  $\sigma$  (таблиця 1). Компенсувати таке погіршення динамічних характеристик можна за рахунок відповідного вибору провідності дроселя  $f_0$  (зниження).

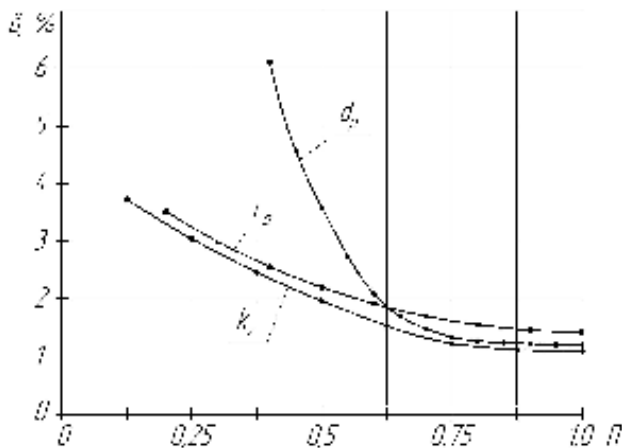


Рисунок 4 — Вплив конструктивних параметрів комбінованого регулятора подачі на похибку стабілізації подачі  $\delta$ .

При роботі АПН у режимі постійної потужності параметри комбінованого регулятора  $d_{p1}$ ,  $c_{p1}$ ,  $k_{Z1}$ ,  $b_{p1}$  і  $f_0$  також неоднозначно впливають на динамічні характеристики системи керування (табл. 1).

До параметрів оптимізації віднесені конструктивні параметри комбінованого регулятора  $d_p$ ,  $c_p$ ,  $d_{p1}$ ,  $c_{p1}$  і  $f_0$ , які мають найбільший вплив на статичні й динамічні характеристики системи керування регульованого АПН. Оптимізація конструкції комбінованого регулятора виконувалася, виходячи з несприятливих поєднань інших параметрів з таблиці 1, що не належать до параметрів опти-

мізації. Якщо критерій оптимізації буде забезпечено при несприятливому поєднанні параметрів, які характеризують умови роботи системи керування у різних режимах роботи АПН, то можна вважати, що критерій оптимізації буде також забезпечений при всіх інших зазначених комбінаціях параметрів.

Діапазони зміни параметрів оптимізації наведено в таблиці 2. Діапазони зміни параметрів вибиралися, виходячи з характеру їх впливу на статичні, динамічні та енергетичні характеристики. Діапазони зміни параметрів оптимізації містили значення параметрів, які забезпечують їх сприятливі комбінації.

Оскільки діапазони зміни зазначених параметрів, наведених в табл. 2, досить вузькі, а характер впливу цих параметрів на статичні та динамічні характеристики гіперболічний (рисунок 4), то кількість дослідів зондування у кожному з діапазонів зміни параметрів може бути невеликою. Оптимізація здійснювалася з кількістю дослідів зондування у діапазоні кожного з параметрів, що дорівнює 3, з рівномірним розподілом значень у діапазоні.

У процесі оптимізації конструкції комбінованого регулятора подачі АПН визначалася послідовність 27 комбінацій параметрів  $d_p$ ,  $c_p$ ,  $f_0$  при роботі АПН у режимі стабілізації подачі і послідовність 27 комбінацій параметрів  $d_{p1}$ ,  $c_{p1}$ ,  $f_0$  при роботі АПН у режимі постійної потужності. Для кожної з комбінацій вказаних параметрів розраховувався перехідний процес змінних стану системи керування регульованого АПН. Також для кожної з комбінацій конструктивних параметрів комбінованого регулятора подачі у режимі стабілізації подачі АПН і у режимі постійної потужності визначалися показники, що входять до критерію оптимізації.

Пошук найкращих параметрів зводився до того, що за першим, відповідно до ранжування, показником критерію оптимізації відшукувалися комбінації, що потрапили у критеріальний інтервал. Після вибору комбінацій за першим за рангом критерієм проходив відбір комбінацій за другим за рангом критерієм, і далі за третім та четвертим критеріями. У результаті можна отримати одну чи декілька комбінацій параметрів, що можуть вважатися оптимальними.

Таблиця 2  
Діапазон зміни параметрів оптимізації

Параметр оптимізації	Одиниця вимірювання	Діапазон зміни при оптимізації
$d_p$	м	$(6,0-10,0) \cdot 10^{-3}$
$d_{p1}$	м	$(6,0-10,0) \cdot 10^{-3}$
$c_p$	Н/м	$(0,8-2,2) \cdot 10^4$
$c_{p1}$	Н/м	$(3,4-10,0) \cdot 10^4$
$f_0$	м <sup>2</sup>	$(0,5-1,5) \cdot 10^{-6}$

Аналіз результатів показав, що знайти дослід, який характеризується комбінацією  $d_p$ ,  $c_p$ ,  $f_0$  при роботі АПН у режимі стабілізації подачі і забезпечує кращі зна-

Параметри оптимізації			Показники критерію оптимізації				№ досліду
1			2				3
Режим стабілізації подачі							
$d_p, \text{ м}$	$c_p, \text{ Н/м}$	$f_0, \text{ м}^2$	стійкість	$\delta, \%$	$t_p, \text{ с}$	$\sigma, \%$	11
$8 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	+	3,2	0,16	9,4	
Режим постійної потужності							
$d_{p1}, \text{ м}$	$c_{p1}, \text{ Н/м}$	$f_0, \text{ м}^2$	стійкість	-	$t_p, \text{ с}$	$\sigma, \%$	24
$8 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	+	-	0,21	12,8	

Примітка. “+” — система стійка; “-” — система нестійка.

чення всіх показників критерію оптимізації, неможливо, оскільки при покращенні одних показників погіршуються інші. З урахуванням важливості показників критерію оптимізації компромісним варіантом будемо вважати комбінацію параметрів у досліді № 11  $d_p=8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $c_p=1,5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$ ,  $f_0=1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , де забезпечуються такі показники критерію оптимізації (табл. 3): стійка робота системи керування АПН в режимі стабілізації подачі, похибка стабілізації подачі  $\delta=3,2\%$ , час регулювання  $t_p=0,16 \text{ с}$  і перерегулювання за тиском  $\sigma=9,4\%$ .

Аналогічно, комбінація параметрів  $d_{p1}, c_{p1}, f_0$  при роботі АПН у режимі постійної потужності не може забезпечити кращі значення всіх показників критерію оптимізації, оскільки при покращенні одних погіршуються інші. З урахуванням важливості показників критерію оптимізації компромісним варіантом будемо вважати комбінацію параметрів у досліді № 24  $d_{p1}=8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $c_{p1}=6,7 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$ ,  $f_0=1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , де забезпечуються такі показники критерію оптимізації (табл. 3): стійка робота системи керування АПН в режимі постійної потужності, час регулювання  $t_p=0,21 \text{ с}$  і перерегулювання за тиском  $\sigma=12,8\%$ .

Отримані в результаті оптимізації комбінації параметрів  $d_p, c_p, d_{p1}, c_{p1}$  і  $f_0$  можуть бути використані при проектуванні дослідного зразка комбінованого регулятора подачі, що входить до системи керування регульованого АПН.

### Висновок

На основі удосконаленого критерію оптимізації, що комплексно враховує статичні та динамічні характеристики системи керування регульованого АПН в режимах стабілізації подачі та постійної потужності, методом ЛП-пошуку знайдено оптимальне сполучення конструктивних параметрів комбінованого регулятора  $d_p=8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $d_{p1}=8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $c_p=1,5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$ ;  $c_{p1}=6,7 \cdot 10^4 \text{ Н/м}$ ;  $f_0=1,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ , при якому в режимі стабілізації подачі забезпечується стійка робота системи керування, похибка стабілізації подачі  $\delta=3,2\%$ , час регулювання  $t_p=0,16 \text{ с}$ , перерегулювання за тиском

$\sigma=9,4\%$ , в режимі постійної потужності — стійка робота системи керування з  $t_p=0,21 \text{ с}$ ,  $\sigma=12,8\%$ .

### Література

1. Свешников, В. К. Аксиально-поршневые насосы в современных гидроприводах / В.К. Свешников // Гидравлика и пневматика: Информационно-технический журнал. — 2005. — № 18. — С. 8—12.
2. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. — М.: Наука, 1981. — 110 с.
3. Попов, Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д.Н. Попов. — М.: Машиностроение, 1976. — 424 с.
4. Буренников, Ю.А. Удосконалення схем регуляторів подачі насосів гідросистем, чутливих до навантаження, та їх статичні характеристики / Ю.А. Буренников, Л.Г. Козлов, С.В. Репінський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 5. — С. 88—92.
5. Burennikov, Yu. Dynamics of the hydraulic drive control system with variable-displacement pump / Yu. Burennikov, L. Kozlov, S. Repinskiy // Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. — 2007. — Tomul LVII (LVII), Fasc. 4. — P. 23—30.
6. Буренников, Ю.А. Про можливість зменшення гідравлічних втрат в системі керування гідроприводом з насосом змінної продуктивності [Електронний ресурс] / Ю.А. Буренников, Л.Г. Козлов, С.В. Репінський // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Електронне наукове фахове видання — 2007. — Вип. 1. — Режим доступу до журн.: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/ukr/07byawvp.pdf>.
7. Буренников, Ю.А. Автоматична система керування регульованим насосом / Ю.А. Буренников, Л.Г. Козлов, С.В. Репінський // Вісник Тернопільського державного технічного університету. — 2009. — № 3. — С. 134—141.

Надійшла 13.07.2011 р.