

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**С. В. Репінський, Л. Г. Козлов, Ю. А. Буренніков**

**КЕРУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ НАСОСІВ  
В ГІДРОПРИВОДАХ,  
ЧУТЛИВИХ ДО НАВАНТАЖЕННЯ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2016

УДК 621.22+62-82+532  
ББК 31.56+34.447+30.123  
Р41

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 12 від 28.04.2016 р.)

Рецензенти:

**В. І. Савуляк**, доктор технічних наук, професор

**В. Ф. Анісімов**, доктор технічних наук, професор

**Репінський, С. В.**

Р41 Керування регульованих насосів в гідроприводах, чутливих до навантаження : монографія / С. В. Репінський, Л. Г. Козлов, Ю. А. Буренніков. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 200 с.

ISBN 978-966-641-673-8

В монографії розглядаються питання щодо створення системи керування регульованого аксіально-поршневого насоса (АПН) з покращеними статичними та динамічними характеристиками в режимах стабілізації подачі (LS-регулювання) та постійної потужності за рахунок використання комбінованого регулятора подачі з профільованим вікном золотника. Наведено результати математичного моделювання, виконано експериментальні дослідження регульованого АПН з дослідним зразком комбінованого регулятора подачі, який розроблений з урахуванням результатів оптимізації. Монографія призначена для інженерно-технічних працівників, науковців та студентів.

УДК 621.22+62-82+532

ББК 31.56+34.447+30.123

ISBN 978-966-641-673-8

© С. Репінський, Л. Козлов, Ю. Буренніков, 2016

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП.....	10
1 РОЗВИТОК СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ НАСОСІВ І СУЧАСНІ КОНСТРУКЦІЇ РЕГУЛЯТОРІВ РОБОЧОГО ОБ'ЄМУ.....	11
1.1 Тенденції розвитку та схеми систем керування регульованих насосів.....	11
1.2 Розвиток конструкцій регуляторів робочого об'єму регульованих насосів.....	27
1.3 Огляд робіт з дослідження процесів в об'ємних гідроприводах на основі регульованих АПН.....	34
2 СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО АПН З ПРОФІЛЬОВАНИМ ВІКНОМ ЗОЛОТНИКА КОМБІНОВАНОГО РЕГУЛЯТОРА ПОДАЧІ.....	43
2.1 Розрахункова схема системи керування регульованого АПН.....	43
2.2 Математична модель системи керування регульованого АПН.....	48
2.3 Методика моделювання та розв'язання рівнянь математичної моделі.....	56
2.4 Методика визначення параметрів профільованого вікна золотника комбінованого регулятора подачі.....	61
3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО АПН.....	71
3.1 Статичні характеристики системи керування регульованого АПН.....	71
3.2 Динамічні характеристики системи керування регульованого АПН.....	74
3.2.1 Методика визначення динамічних характеристик....	74
3.2.2 Діапазон зміни параметрів системи керування при дослідженні динамічних характеристик.....	77

3.2.3 Дослідження динамічних характеристик системи керування в режимі стабілізації подачі робочої рідини регульованим АПН.....	79
3.2.4 Дослідження динамічних характеристик системи керування в режимі постійної потужності регульованого АПН.....	84
3.2.5 Вплив співвідношення параметрів системи керування на час регулювання змінних стану системи в різних режимах стабілізації подачі регульованого АПН.....	90
3.2.6 Висновки з дослідження динамічних характеристик.....	94
3.3 Енергетичні характеристики системи керування регульованого АПН.....	95
3.4 Оптимізація конструктивних параметрів комбінованого регулятора подачі регульованого АПН.....	100
3.4.1 Вибір показників критерію оптимізації.....	101
3.4.2 Вибір параметрів оптимізації і діапазонів їх змінювання.....	102
3.4.3 Оптимізація конструктивних параметрів комбінованого регулятора подачі.....	104
<b>4 МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНОГО АПН.....</b>	<b>107</b>
4.1 Дослідний зразок комбінованого регулятора подачі регульованого АПН.....	108
4.2 Схеми та конструкції експериментальних стендів.....	114
4.2.1 Експериментальний стенд для дослідження статичних характеристик системи керування.....	115
4.2.2 Експериментальний стенд для дослідження динамічних характеристик системи керування.....	118
4.2.3 Експериментальний стенд для визначення витрати через профільоване робоче вікно золотника.....	120
4.3 Вимірювально-реєструвальна апаратура експериментальних стендів.....	122
4.4 Результати експериментальних досліджень.....	124

4.4.1 Статична характеристика регульованого АПН з комбінованим регулятором подачі.....	124
4.4.2 Експериментальне визначення моменту опору планшайби регульованого АПН.....	131
4.4.3 Визначення витрати через профільоване робоче вікно золотника.....	138
4.4.4 Осцилографування перехідних процесів в системі керування регульованого АПН.....	146
4.5 Технічна характеристика дослідного зразка комбінованого регулятора подачі.....	152
<b>5 ВДОСКОНАЛЕННЯ ГІДРОПРИВОДУ ОБЕРТАННЯ ЗМІШУВАЛЬНОГО БАРАБАНА АВТОБЕТОНОЗМІШУВАЧА..</b>	<b>155</b>
5.1 Гідромеханічний привід обертання змішувального барабана автобетонозмішувача.....	155
5.2 Вдосконалення схеми гідроприводу обертання змішувального барабана автобетонозмішувача.....	159
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>166</b>
Додаток А. Конструкції регуляторів робочого об'єму регульованих АПН.....	169
Додаток Б. Характеристики вимірювально-реєструвальної апаратури експериментальних стендів.....	177
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>186</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- $A$  – усталене значення змінної, що описує стан системи керування
- $A_{\max}$  – максимальне значення змінної, що описує стан системи керування
- $b_p$  – коефіцієнт демпфування золотника регулятора подачі
- $b_{p1}$  – коефіцієнт демпфування золотника регулятора потужності
- $b_\gamma$  – коефіцієнт демпфування планшайби насоса
- $c_p$  – жорсткість пружини золотника регулятора подачі
- $c_{p1}$  – жорсткість пружини золотника регулятора потужності
- $d_7$  – діаметр поршнів насоса
- $d_8$  – діаметр розміщення поршнів в роторі насоса
- $d_p$  – діаметр золотника регулятора подачі
- $d_{p1}$  – діаметр золотника регулятора потужності
- $f(z)$  – площа відкриття робочого вікна золотника регулятора подачі
- $f_0$  – площа відкриття вікна дроселя в зливній гідролінії циліндра керування планшайбою насоса
- $f_1(z_1)$  – площа відкриття профільованого робочого вікна золотника регулятора потужності
- $f_{op}$  – площа відкриття робочого вікна пропорційного розподільника
- $f_{\min}$  – мінімальна площа відкриття робочого вікна пропорційного розподільника
- $f_{\max}$  – максимальна площа відкриття робочого вікна пропорційного розподільника
- $F_4$  – площа циліндра керування положенням планшайби насоса;
- $F_5$  – площа підпружиненого циліндра керування положенням планшайби насоса
- $F_p$  – критерій Фішера
- $G_p$  – критерій Кохрена
- $I$  – момент інерції планшайби насоса
- $k$  – коливальність змінних стану системи

- $k_1$  – кількість поршнів насоса  
 $k_z$  – коефіцієнт підсилення вікна золотника регулятора подачі  
 $k_{z1}$  – коефіцієнт підсилення профільованого вікна золотника регулятора потужності  
 $k_{z11}, k_{z12}, k_{z13}$  – коефіцієнти підсилення профільованого вікна золотника регулятора потужності з координатами положення відповідно  $z_{11}, z_{12}, z_{13}$   
 $\ell$  – плече дії циліндрів керування на планшайбу насоса  
 $m_p$  – маса золотника регулятора подачі  
 $m_{p1}$  – маса золотника регулятора потужності  
 $M_C(p_H, Q_n, t^0)$  – момент опору планшайби насоса  
 $n$  – частота обертання вала насоса  
 $N_{1emp}$  – втрати потужності у системі керування регульованого насоса  
 $N_{2emp}$  – гідравлічні втрати потужності насоса  
 $N_{кор}$  – корисна потужність  
 $N_H$  – потужність на виході насоса  
 $p_1$  – тиск навантаження на виконавчому гідродвигуні  
 $p_H$  – тиск на виході насоса  
 $p_{Ц}$  – тиск в циліндрі керування положенням планшайби насоса  
 $Q_n$  – подача робочої рідини до виконавчого гідродвигуна  
 $Q_{n\min}$  – мінімальна подача до виконавчого гідродвигуна  
 $Q_{n\max}$  – максимальна подача до виконавчого гідродвигуна  
 $Q_H$  – подача робочої рідини на виході регульованого аксіально-поршневого насоса  
 $Q_{Ц}$  – витрата через робоче вікно золотника регулятора подачі  
 $Q_{Ц1}(p_H, p_{Ц}, z_1)$  – витрата через профільоване робоче вікно золотника регулятора потужності  
 $Q_{cm}$  – витрата, обумовлена стисненням робочої рідини об'ємом  $W_H$   
 $Q_{cm1}$  – витрата, обумовлена стисненням робочої рідини об'ємом  $W_{Ц}$

- $Q_{f0}$  – витрата через дросель в зливній гідролінії циліндра керування положенням планшайби насоса  
 $S_{ag}^2$  – дисперсія адекватності  
 $S^2(y)$  – дисперсія відтворюваності  
 $t$  – модельний час  
 $t^\circ$  – температура робочої рідини  
 $t_p$  – час регулювання змінних стану системи  
 $T_p$  – сила сухого тертя золотника регулятора подачі  
 $T_{p1}$  – сила сухого тертя золотника регулятора потужності  
 $W_H$  – об'єм робочої рідини в гідролінії нагнітання  
 $W_{II}$  – об'єм робочої рідини в циліндрі керування планшайбою насоса і на ділянці гідролінії, що прилягає до нього  
 $z$  – переміщення золотника регулятора подачі  
 $z_1$  – переміщення золотника регулятора потужності  
 $z_{11}, z_{12}, z_{13}$  – координати положення ділянок профільованого вікна з коефіцієнтами підсилення відповідно  $k_{z11}, k_{z12}$  і  $k_{z13}$   
 $z_p$  – попереднє стиснення пружини золотника регулятора подачі  
 $z_{p1}$  – попереднє стиснення пружини золотника регулятора потужності  
 $\beta(p)$  – коефіцієнт, що враховує сумарну деформацію робочої рідини та гідроліній  
 $\gamma$  – кут повороту планшайби насоса  
 $\delta$  – похибка стабілізації подачі  
 $\Delta p$  – перепад тиску на профільованому робочому вікні золотника регулятора потужності  
 $\Delta p_{LS}$  – перепад тиску на робочому вікні золотника регулятора подачі  
 $\eta_e$  – гідравлічний ККД системи керування регульованого насоса  
 $\mu$  – коефіцієнт витрати через дросельні і золотникові елементи  
 $\rho$  – густина робочої рідини  
 $\sigma$  – перерегулювання змінних стану системи



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АБЗ – автобетонозмішувач
- АПН – аксіально-поршневий насос
- КРП – комбінований регулятор подачі
- СПП – система постійної подачі
- СПТ – система постійного тиску
- ССП – система з суматором потоків
- СЧН – система, чутлива до навантаження
- СЧН-Н – система, чутлива до навантаження з нерегульованим насосом
- СЧН-Р – система, чутлива до навантаження з регульованим насосом
- LS – «load sensing system» або система, чутлива до навантаження (СЧН)

## ВСТУП

Останніми десятиліттями розвиток гідроприводів мобільних робочих машин характеризується стійкою тенденцією до широкого застосування регульованих аксіально-поршневих насосів (АПН) з регуляторами подачі, які входять до системи керування робочим об'ємом АПН. Ця тенденція пояснюється прагненням розробників і споживачів гідроустаткування до розширення функціональних можливостей, реалізації режимів енергозбереження і оптимального використання потужності двигуна при виконанні робочих процесів. Регулятори подачі в значній мірі визначають технічні характеристики і функціональні можливості регульованих АПН, а отже, і технічний рівень сучасного гідроприводу.

Провідні фірми США, Західної Європи і Японії виготовляють широкий асортимент регульованих АПН, що характеризуються високим технічним рівнем і можуть оснащуватися різноманітними системами керування. На сьогодні виробництво об'ємних гідромашин (зокрема насосів і їх систем керування) ведуть підприємства України. Їх ринок аксіально-поршневих гідромашин для цивільних галузей промисловості до початку 90-х років ХХ ст. був сформований, в основному, на базі створених за допомогою ФРН ліцензійних виробництв. В Україні наявний виробничий і технологічний потенціал, а також досвід виробництва регульованих об'ємних гідромашин. Однак потребує вдосконалення система керування регульованого АПН, зокрема регулятор подачі, з точки зору забезпечення належного поєднання статичних, динамічних і енергетичних характеристик, що відповідають світовому рівню.

Роботи з особливостей проектування і дослідженням системи керування регульованих АПН з регуляторами подачі, практично відсутні. Тому розробка системи керування регульованого АПН з покращеними статичними і динамічними характеристиками в різних режимах роботи за рахунок використання вдосконаленого комбінованого регулятора подачі (КРП) є актуальною науково-технічною задачею та має в умовах вітчизняної промисловості широкі перспективи впровадження і використання.

# 1 РОЗВИТОК СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ НАСОСІВ І СУЧАСНІ КОНСТРУКЦІЇ РЕГУЛЯТОРІВ РОБОЧОГО ОБ'ЄМУ

## 1.1 Тенденції розвитку та схеми систем керування регульованих насосів

АПН широко застосовуються в сучасних гідроприводах, головним чином, середнього і високого тисків, завдяки своїй компактності, порівняно простій і відпрацьованій конструкції, різноманітним можливостям регулювання і відмінним експлуатаційним характеристикам [3–5, 21, 84, 110, 111, 115–117, 151]. За конструктивними ознаками розрізняють АПН з похилим диском і похилим блоком.

Робочий об'єм насосів залежить від кута нахилу задавального елемента, площі і кількості поршнів, діаметра кола їх розміщення в блоці циліндрів і визначається за такими формулами:

- для АПН з похилим диском

$$q_{\text{пд}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot z \cdot D \cdot \text{tg} \gamma_{\text{пд}}, \quad (1.1)$$

- для АПН з похилим блоком циліндрів

$$q_{\text{пб}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot z \cdot D \cdot \sin \gamma_{\text{пб}}, \quad (1.2)$$

де  $z$  – кількість поршнів;  $d$  – діаметр поршня;  $D$  – діаметр кола розміщення поршнів в блоці циліндрів;  $\gamma_{\text{пд}}$  і  $\gamma_{\text{пб}}$  – кути нахилу диска до блока циліндрів і блока циліндрів до вихідного вала насоса відповідно.

Асортимент сучасних АПН з похилим диском містить виконання з робочими об'ємами  $q_0 = 4 \dots 1000 \text{ см}^3$ , тисками  $p = 8 \dots 45 \text{ МПа}$  і частотою обертання  $n$  до  $5000 \text{ хв}^{-1}$  [115–117]. Слід відмітити сучасні відмінні особливості АПН:

- високий ККД (для насоса з  $q_0 = 40 \text{ см}^3$  при  $n = 2600 \text{ хв}^{-1}$   $\eta_{\text{еф}} = 0,93$ );

- добра здатність до всмоктування (абсолютний тиск у всмоктувальній лінії 0,08...3 МПа, діаметр всмоктувального отвору 40 мм для насоса з  $q_0 = 40 \text{ см}^3$ );

- низький рівень шуму;

- висока довговічність;

- можливість значних радіальних і осьових навантажень на приводному валу (для насоса з  $q_0 = 40 \text{ см}^3$  допустиме осьове навантаження  $\pm 600 \text{ Н}$  і радіальне – до 1000 Н);

- компактність конструкції;

- модульний принцип побудови;

- наявність виконань з наскрізним валом для комбінацій з різними насосами;

- наявність індикатора кута нахилу;

- стандартизовані за нормами ISO приєднувальні розміри;

- можливість різних варіантів монтажу, в тому числі над і під рівнем рідини в баці;

- широкий діапазон температур і в'язкості робочої рідини (від  $-25$  до  $+90 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\nu = 10 \dots 1000 \text{ мм}^2/\text{с}$ );

- можливість роботи на водомістких рідинах (при роботі насосів з  $q_0 = 40 \dots 500 \text{ см}^3$  на емульсії НФА «масло в воді» з 95 %-им вмістом води номінальний тиск обмежується до 14 МПа, піковий – до 16 МПа, частота обертання  $1950 \dots 1000 \text{ хв}^{-1}$  в залежності від  $q_0$ );

- велика різноманітність механізмів керування з високою швидкістю, побудованих за модульним принципом.

Для всіх етапів створення і розвитку вітчизняних гідроприводів (особливо тракторних і сільськогосподарських) характерна безпосередня і провідна участь таких організацій, як ВНДІ Гідропривод, НАТІ, ВНДІ Будмаш, ВІМ, ВІСХОМ [36, 38, 41, 55, 77, 78, 90, 105, 126, 127, 152].

В 70-х роках ХХ ст. виникла необхідність ефективного приводу гідрофікованих активних робочих органів машин, розширення кількості машин і знарядь з більшою кількістю гідроциліндрів, що вимагають «жорсткої» послідовності роботи. Перед провідними організаціями поставало завдання створення гідросистем відбору потужності тракторів. Специфікою таких гідроприводів є забезпечення одночасної роботи декількох, у більшості випадків відносно потужних, споживачів у взаємозалежних, регульованих, економічних швидкісних режимах.

Реалізована в традиційних гідронавісних системах схема постійної подачі (СПП) на базі одного нерегульованого насоса не забезпечувала одночасної взаємозалежної роботи різних споживачів через наявність так званого «гідродиференціала», що спричиняє переважне живлення менш навантажених з паралельно підключених гідродвигунів. Зазначена обставина визначила доцільність пошуку інших схемних рішень, спрямованих на оптимальне вирішення відповідних завдань.

В 60-х і 70-х роках минулого століття як основні варіанти багатопотокових гідросистем в світовому гідроприводі, зокрема тракторобудуванні, розглядалися системи постійного тиску (СПТ) і системи з суматором потоків (ССП) (рис. 1.1).

СПТ (див. рис. 1.1) виконувалися на основі регульованого насоса (фірми John Deere й Massey-Ferguson) або на поєднанні нерегульованого насоса й гідроакумулятора (фірма Ford). Принцип роботи цих систем – автоматичне збільшення подачі робочої рідини в напірну гідролінію від регульованого насоса або гідроакумулятора при підключенні споживачів і підтримка за рахунок цього постійного живильного тиску. Ця гідросистема повністю відповідає функціональним вимогам, дозволяючи забезпечити живлення всіх споживачів гідравлічної енергії від одного насоса в регульованих швидкісних режимах. Однак загальним недоліком, що істотно знижує експлуатаційну економічність гідросистем типу СПТ, є значні втрати потужності в робочих контурах з гідродвигунами, недовантаженими за тиском, що обмежує область оптимального застосування приводом малопотужних споживачів або споживачів зі стабільним навантаженням.

В 70-х роках ХХ ст. в результаті проведеного НАПІ техніко-економічного аналізу було встановлено, що для парку тракторів й агрегованих машин в найближчій перспективі максимальна ефективність (виходячи з витрат на виготовлення й експлуатацію) буде досягнута створенням гідросистем відбору потужності (ГСВП) типу ССП (див. рис. 1.1). Реалізація багатонасосних систем на основі дешевих і компактних шестеренних гідромашин (переважно секційного виконання) за рахунок індивідуального живлення окремих споживачів (або груп відносно рівномірно навантажених споживачів) створила передумови для запобігання втратам потужності, пов'язаних з недовантаженням гідродвигунів за тиском [36, 55, 126]. Причому в такій системі не вимагалось використання дросельних регуляторів витрати.


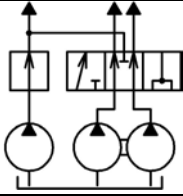
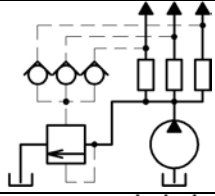
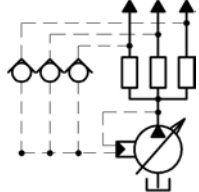
Склад схеми і її позначення	Зображення схеми	Втрати потужності при недовантаженні по тиску та подачі до $i$ -го споживача
Регульований насос з регулятором постійного тиску, СПТ		$\sum_{i=1}^n Q_i (p_H - p_i)$
Декілька нерегульованих насосів з суматором потоків, ССП		$\sum_{i=1}^n p_i (Q_{iH} - Q_i)$
Нерегульований насос в поєднанні з регулятором типу СЧН, СЧН-Н		$p_M Q_H - \sum_{i=1}^n p_i Q_i$
Регульований насос в поєднанні з регулятором типу СЧН, СЧН-Р		$\sum_{i=1}^n Q_i (p_M - p_i)$

Рисунок 1.1 – Основні варіанти схем багатопотокових гідросистем:

$Q_i$  – подача до  $i$ -го споживача;  $p_H$  – тиск на виході насоса;

$p_i$  – тиск, обумовлений навантаженням  $i$ -го споживача;  $Q_{iH}$  – подача  $i$ -го насоса;  $p_M$  – тиск, що відповідає найбільш навантаженому споживачеві

У XXI столітті підвищення вимог, які висуваються до машин щодо їх швидкодії, точності, надійності, економічності, керованості, інтелектуальності, збільшення потрібних потужностей разом з ускладненням циклів і функцій, які виконуються гідроагрегатами, вимагає вдосконалення і розроблення гідроагрегатів, які б базувалися на нових сучасних технічних рішеннях, задовольняли всі висунуті до них вимоги і відповідали світовому рівню.

В Україні до цього часу більшість мобільних робочих машин будівельного і сільськогосподарського призначення оснащуються гідросистемами, створеними на базі нерегульованих шестеренних насосів [21, 43, 63, 64, 110]. Ці гідросистеми були розроблені і освоєні нашою промисловістю в 50-х та на початку 60-х років минулого століття і до теперішнього часу не зазнали кардинальних змін. Такі гідросистеми

відрізняються надійністю і невисокою вартістю, але разом з тим не дозволяють регулювати параметри руху робочих органів машин у достатньо широких діапазонах, а отже, не можуть забезпечити оптимального протікання робочих процесів. Це знижує якість виконуваних робіт і продуктивність машин. Забезпечення можливості регулювання параметрів руху робочих органів дозволяє істотно підвищити як продуктивність і якість робіт машин, так і їх економічність [45, 73, 90, 127, 131].

В країнах Північної Америки, Західної Європи та Японії в середині 70-х – на початку 80-х років ХХ ст. почався процес переоснащення робочих машин гідросистемами на базі регульованих насосів, що істотно підвищило їх технічний рівень. Спочатку з'явилися регульовані в широких діапазонах гідросистеми постійного тиску, а потім комбіновані гідросистеми, які отримали назву «системи, чутливі до навантаження» (СЧН) або так звані «load sensing system» (LS системи) [141, 143, 153, 154, 156].

Особливістю цих систем є забезпечення взаємозалежного приводу різних гідродвигунів від одного насоса при тиску в напірній гідролінії, що відповідає найбільш навантаженому споживачеві, що створює передумови для істотного зменшення втрат потужності в порівнянні з гідросистемою типу СПТ. Робота в режимі «чутливий до навантаження» досягається за рахунок контролю величин витрат робочої рідини в робочих контурах й автоматичному коректуванню величини подачі в напірну гідролінію при відхиленні витрат від заданих значень.

Гідросистема СЧН може бути виконана у двох варіантах: з нерегульованим насосом (СЧН-Н) і регульованим насосом (СЧН-Р) (див. рис. 1.1). У гідросистемі з нерегульованим насосом зміна подачі забезпечується відкриттям-закриттям пропускнуго клапана, а в гідросистемі з регульованим насосом – зміною його робочого об'єму.

Основними компонентами, що визначають технічний рівень гідросистем типу СЧН, є регульовані насоси, регулятори робочого об'єму насосів і гідророзподільники з пристроями відстеження тиску навантаження споживачів.

Вперше гідросистеми СЧН були реалізовані в 70-х роках ХХ ст. на потужних сільськогосподарських тракторах фірмами Allis-Chalmers і Case. Однак, незважаючи на очевидні функціональні й енергетичні

переваги гідросистем нового типу, розширення їхнього застосування стримувалося складністю експлуатації і відносно високою вартістю відповідних гідроагрегатів. В наступний період розвиток систем кондиціонування робочої рідини й удосконалення спеціальних гідравлічних компонентів створили передумови для витіснення традиційних гідросистем системами чутливими до навантаження і реалізації на їхній базі централізованих гідросистем, що забезпечують живлення різних гідромеханізмів агрегатованих машин від загального джерела живлення.

Такими гідросистемами оснащують свої машини в США компанії Allise-Chalmers, Case-Poclair, Caterpillar, в Західній Європі – компанії Atlas-Weyhausen, Bosch Rexroth, в Японії – Kato, Hitachi, Komatsu і ін. [88, 89, 104, 106, 119, 125, 144, 148, 155]. Значна кількість провідних компаній випускає гідроагрегати для гідросистем з LS-регулюванням, серед яких Sauer-Danfoss, Rexroth, Linde Hydraulics (Німеччина), Vickers (Великобританія), Parker Hydraulics, Denison (США), GTN Hydraulics a. s (Республіка Словачія, торговий представник – фірма APIS a. s), Poclair hydraulics (Франція), Samhydraulic (група Brevini, Італія), Bondioli and Pavesi (Італія) та ін. [2, 59–62, 105, 106, 113–117, 133, 134, 145–147].

В СРСР був накопичений значний досвід досліджень, розрахунків і проектування в галузі гідроприводів зусиллями таких вчених, як Т. В. Алексєєва, Т. М. Башта, В. П. Бочаров, Л. В. Васильєв, І. З. Зайченко, Р. Д. Іскович-Лотоцький, К. Л. Коробочкін, З. Я. Лур'є, Б. А. Любімов, К. Л. Навроцький, І. А. Немировський, А. Ф. Пономарчук, Д. Н. Попов, В. Н. Прокоф'єв, Т. А. Сиріцин, В. Б. Струтинський, О. М. Яхно та ін. Їхні розробки і дослідження можуть служити основою для створення гідроагрегатів і гідроприводів, що відповідають світовому рівню.

В Україні на цей час певних успіхів в даному напрямку досягли Вінницький національний технічний університет, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», ВАТ «Борекс».

Основним елементом систем керування регульованих насосів є регулятори робочого об'єму. Регулятори робочого об'єму, відслідковуючи сигнал керування, змінюють робочий об'єм регульованих насосів і за функціональними та конструктивними ознаками достатньо різнома-



нітні, але продовжують інтенсивно розвиватися з метою отримання гідроприводів з різними статичними характеристиками для відповідних робочих процесів [3, 8, 17, 18, 103, 110, 111, 115–117, 142].

Слід розглянути та порівняти детальніше енергобаланс і можливості регулювання параметрів руху робочих органів найпоширеніших систем керування регульованих насосів.

Для порівняння на рис. 1.2 зображений енергобаланс, статична характеристика і графік розподілення потужності системи дросельного керування з нерегульованим насосом.

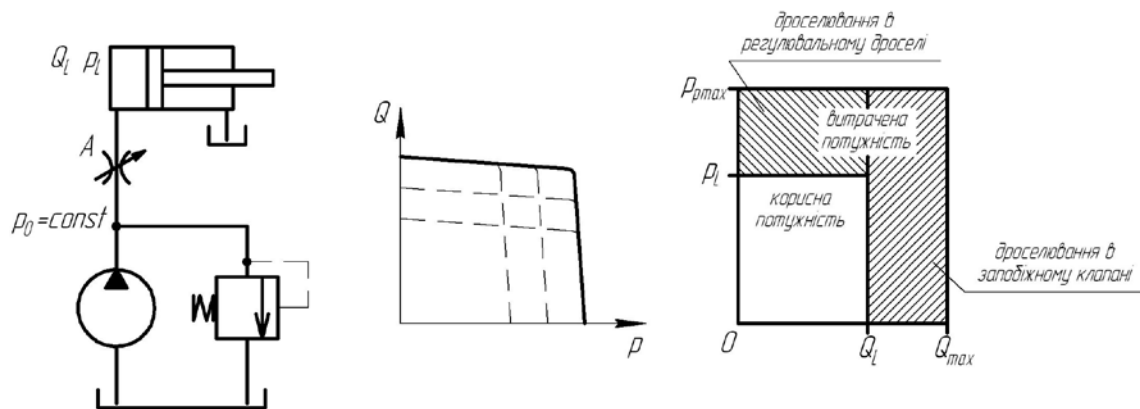


Рисунок 1.2 – Система дросельного керування з постійною продуктивністю

За допомогою запобіжного клапана тиск у системі встановлюється на величину  $p_0$ . Під час експлуатації різниця між необхідною гідравлічною потужністю і встановленою потужністю, на яку відрегульований дросель, необоротно перетворюється в тепло. За допомогою зміни величини прохідного перерізу дроселя  $A$  здійснюється дроселювання тиску живлення на величину необхідного тиску навантаження  $p_L$  (втрати, залежні від тиску). Надлишковий об’ємний потік повертається назад через запобіжний клапан, що обмежує тиск, у бак (втрати залежать від об’ємного потоку).

Величина оптимального ККД подібної системи обчислюється величиною  $\eta_{opt} = 38\%$ . Це значить, що близько 60% встановленої потужності, що віддається насосом у мережу шляхом дроселювання на дроселі і втрат у запобіжному клапані, перетворюється у тепло [5, 8, 17, 18, 45, 110, 111, 121].

На рис. 1.3 зображено схему СПТ з регульованим насосом і регулятором компенсації тиску, що дозволяє вручну або дистанційно (за

допомогою клапана) змінювати тиск від 2 до 35 МПа і підтримувати його на заданому рівні в усьому діапазоні подач.

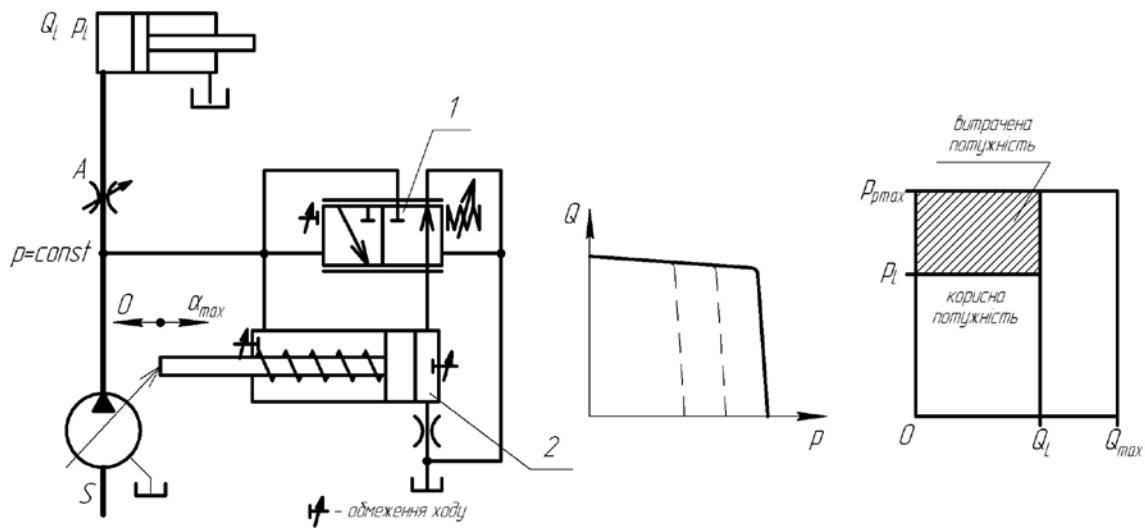


Рисунок 1.3 – Система постійного тиску з регулятором компенсації тиску

Величина бажаного тиску  $p_1$  встановлюється шляхом настроювання пружини розподільника 1. При  $p < p_1$  золотник розподільника перебуває в правому положенні, і поршнева порожнина диференціального циліндра керування 2 з'єднується із дренажною лінією. Тиском у штоковій порожнині й зусиллям пружини шток циліндра зміщується вправо, і похилий диск насоса встановлюється в положення максимального кута нахилу ( $\alpha_{\text{max}}$ ), що відповідає максимальній подачі насоса. Коли тиск у гідросистемі досягає значення  $p_1$  золотник розподільника зміщується вправо, поршнева порожнина циліндра 2 з'єднується з напірною лінією й кут нахилу  $\alpha$  зменшується практично до нуля (до величини, необхідної для компенсації витоків у гідросистемі при тиску  $p_1$ ). У діапазоні зміни подачі насоса від  $Q_{\text{ном}}$  до нуля зміна тиску не перевищує 0,3 МПа. У таких механізмах передбачена можливість обмеження ходу золотника розподільника 1 і двостороннього обмеження ходу циліндра 2.

Таким чином, у СПТ регульований насос автоматично регулює подачу за потребою навантаження. Скоординований потік подається завжди з максимальним тиском. Різниця між тиском навантаження  $p_L$ , що вимагається, і максимальним тиском повинна дроселюватись через

керівну кромку золотника дроселя. Для величини ККД це означає усунення залежних від об'ємного потоку втрат (див. рис. 1.2). Розрахунок величини ККД дає в результаті оптимальне значення 67 % при тиску навантаження  $p_L = \frac{2}{3} p_0$  ( $p_0$  – тиск подачі живлення;  $p_L$  – тиск навантаження) [5, 8, 17, 18, 45, 103, 110, 121].

Для мінімізації втрат, залежних від тиску, використовується гідро-система СЧН-Н (рис. 1.4). За допомогою чутливого LS-клапана постійно знімається тиск навантаження в даний момент часу. Величина цього тиску навантаження порівнюється за допомогою регульовального пристрою з тиском насоса. Метою такого схемного з'єднання є те, що перепад тиску  $\Delta p_{LS}$  на регульованому дроселі підтримується на постійному рівні. Тиск на виході насоса складається з тиску навантаження  $p_L$  на найбільш навантаженому споживачеві і постійного перепаду тиску  $\Delta p_{LS}$  на регульованому дроселі. При цьому можуть бути знижені тільки втрати, залежні від тиску. Надлишковий об'ємний потік (об'ємна подача) скидається через клапан постійної різниці тиску в бак.

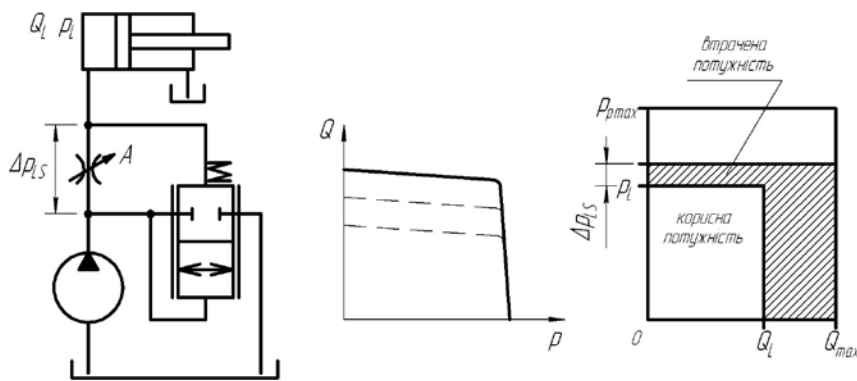


Рисунок 1.4 – Система, чутлива до навантаження, з насосом постійної продуктивності та LS-клапаном

Для зниження втрат, що залежать від тиску й об'ємної подачі, необхідний регульований насос. Це завдання вирішується в системі, чутливій до навантаження СЧН-Р, з регульованим насосом і регулятором подачі (LS-регулятором). Схема з'єднання, статична характеристика і енергобаланс зображені на рис. 1.5.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамов Е. И. Элементы гидропривода / Е. И. Абрамов, К. А. Колесниченко, В. Т. Маслов. – К. : Техника, 1977. – 320 с.
2. Аврунин Г. А. Обзор рынка гидрооборудования / Г. А. Аврунин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2005. – № 3. – С. 12–22.
3. Аврунин Г. А. Анализ современного технического уровня гидрообъемных передач / Г. А. Аврунин, И. В. Чабаненко, В. В. Хвиль // Вибрации в технике и технологиях. – 2003. – № 4(30). – С. 3–6.
4. Аврунин Г. А. Анализ технического уровня аксиально-поршневых гидромашин / Г. А. Аврунин, И. Г. Кириченко, И. И. Мороз // Промислова гідравліка і пневматика. – 2008. – № 2(20). – С. 16–22.
5. Аврунин Г. А. Современные регуляторы изменения рабочего объема гидромашин / Г. А. Аврунин, Л. В. Назаров, В. А. Мазничко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – ПолтНТУ. – Вип. 23., т. 1. – 2009. – С. 72–83.
6. Автобетоносмесители. Руководство по эксплуатации 3101. РЭ / ЗАО «КОМЗ-Экспорт», TIGARBO, 2006. – 48 с.
7. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 280 с.
8. Аналіз переваг та недоліків існуючих регуляторів подачі та потужності в системі керування аксіально-поршневого регульованого насоса / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський, О. В. Поліщук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 5. – С. 107–113.
9. Атлас конструкций гидромашин и гидропередач : учебн. пособие [для студентов машиностроительных специальностей вузов] / Б. М. Бим-Бад, М. Г. Кабаков, В. Н. Прокофьев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1990. – 136 с.
10. Башта Т. М. Объёмные насосы и гидравлические двигатели гидросистем / Т. М. Башта. – М. : Машиностроение, 1974. – 607 с.
11. Башта Т. М. Объёмные гидравлические приводы / Т. М. Башта, И. З. Зайченко, В. В. Ермаков, Е. М. Хаймович. – М.: Машиностроение, 1969. – 628 с.
12. Белецкий Б. Ф. Строительные машины и оборудование : справочное пособие [для инженерно-технических работников строитель-

ных организаций, студентов строительных вузов, факультетов и техникумов] / Б. Ф. Белецкий, И. Г. Булгакова. – 2-е изд. переработ. и дополн. – Ростов н/Д : Феникс, 2005. – 608 с.

13. Борисова Н. А. Переустановочное усилие на шайбе аксиально-поршневого насоса при малых углах наклона / Н. А. Борисова ; под ред. В. Н. Прокофьева // Гидроавтоматика. – М., 1965. – С. 111–115.

14. Боровин Г. К. Математическое моделирование гидравлического привода с LS-управлением ноги шагающей машины / Г. К. Боровин, А. В. Костюк. – М., 2001. – 28 с. – (Препринт ИПМ РАН им. М. В. Келдыша № 54).

15. Боровин Г. К. Моделирование динамики гидропривода ноги шагающей машины / Г. К. Боровин, А. В. Костюк. – М., 2002. – 28 с. – (Препринт ИПМ РАН им. М. В. Келдыша № 8).

16. Боровин Г. К. Математическое моделирование гидравлической системы управления экзоскелетона / Г. К. Боровин, А. В. Костюк, Д. Сит. – М., 2004. – 24 с. – (Препринт ИПМ РАН им. М. В. Келдыша).

17. Брон Л. С. Гидравлический привод агрегатных станков и автоматических линий / Л. С. Брон, Ж. Э. Тартаковский – М. : Машиностроение, 1974. – 327 с.

18. Бондарь В. А. Система load-sensing в сельскохозяйственной технике / В. А. Бондарь // Вибрации в технике и технологиях. – 2003. – № 4(30). – С. 19–26.

19. Бочаров В. П. Исследование объемного гидронасоса со струйным регулятором подачи / В. П. Бочаров, Б. С. Лобанов, В. Б. Струтинский // Гидропривод и гидропневмоавтоматика : межвед. научн.-техн. сб. – К. : Техника. – 1977. – Вып. 13. – С. 55–58.

20. Буренников Ю. А. Повышение эффективности регулируемых гидромеханизмов технологических машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / Буренников Юрий Анатольевич. – К., 1984. – 216 с.

21. Буренніков Ю. А. Удосконалення схем регуляторів подачі насосів гідросистем, чутливих до навантаження, та їх статичні характеристики / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2004. – № 5. – С. 88–92.

22. Буренніков Ю. А. Моделювання системи керування насосом змінної продуктивності за допомогою програмного пакета MATLAB Simulink / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2005) : VIII міжнар. наук.-техн. конф., 24–27 жовтня 2005 р. : тези доп. – Вінниця, 2005. – С. 257.

23. Буренніков Ю. А. Моделювання системи керування насосом змінної продуктивності за допомогою програмного пакета MATLAB Simulink / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – № 1(5). – С. 89–93.

24. Буренніков Ю. А. Дослідження стійкості гідроприводу з насосом змінної продуктивності / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2006. – № 3(7). – С. 30–35.

25. Буренніков Ю. А. Вибір параметрів гідропривода з регульованим насосом на основі дослідження його стійкості / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // XIII Міжнародна конференція з автоматичного управління (Автоматика-2006) : тези доп. – Вінниця, 2006. – С. 236.

26. Буренніков Ю. А. Вибір параметрів системи керування гідроприводом з насосом змінної продуктивності на основі дослідження його стійкості / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2006. – № 6. – С. 211–217.

27. Буренніков Ю. А. Математичне моделювання системи управління гідроприводом з пропорційним керуванням / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2007. – № 3(109), ч. 1. – С. 20–26.

28. Буренніков Ю. А. Про можливість зменшення гідравлічних втрат в системі керування гідроприводом з насосом змінної продуктивності [Електронний ресурс] / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. Електронне наукове фахове видання – 2007. – Випуск № 1. – Режим доступу до журн.: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/ukr/07byawvp.pdf>.

29. Буренніков Ю. А. Експериментальний стенд для дослідження характеристик гідропривода з насосом змінної продуктивності / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Промислова гідравліка і пневматика. – 2007. – № 4(18). – С. 79–82.

30. Буренніков Ю. А. Ідентифікація математичної моделі системи керування насосом змінної продуктивності [Електронний ресурс] / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2008) : IX міжнар. наук.-техн.

конф., 21–24 жовтня 2008 р. : тези доп. – Режим доступу: [http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2008/materials/subsection\\_3.4.pdf](http://www.vstu.vinnica.ua/mccs2008/materials/subsection_3.4.pdf).

31. Буренніков Ю. А. Динаміка системи керування регульованим насосом з автоматичним регулятором подачі / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»). – Луцьк, 2009. – Вип. 25, ч. II. – С. 26–30.

32. Буренніков Ю. А. Автоматична система керування регульованим насосом / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2009. – Т. 14, № 3. – С. 134–141.

33. Буренніков Ю. А. Система керування аксіально-поршневого насоса і дослідний зразок автоматичного комбінованого регулятора / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 5. – С. 122–126.

34. Буренніков Ю. А. Система керування аксіально-поршневого регульованого насоса з профільованим вікном золотника комбінованого регулятора подачі / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Машинобудування». – 2012. – № 64. – С. 113–118.

35. Валиков В. П. Электрогидравлические приводы ВНИИ «Сигнал» / В. П. Валиков, В. И. Медведев, Б. А. Хорохорин // Приводная техника. – 1995. – №3 (10).

36. Васильев Л. В. Современные требования к гидросистемам сельскохозяйственных тракторов / Л. В. Васильев // Тракторы и с/х машины. – 2004. – № 1. – С. 20–25.

37. Васильев Ф. П. Методы оптимизации / Ф. П. Васильев – М. : Факториал пресс, 2002. – 824 с.

38. Васильченко В. А. Гидравлическое оборудование мобильных машин : справочник. / В. А. Васильченко – М. : Машиностроение, 1983. – 301 с.

39. Габай Е. В. Автоматическое регулирование гидрообъемной системы отбора мощности трактора / Е. В. Габай // Основы общей теории сельскохозяйственного гидропривода. – М. : Колос, 1978. – С. 110–172.

40. Гамынин Н. С. Гидравлический привод систем управления / Н. С. Гамынин – М. : Машиностроение, 1972. – 376 с.

41. Гидравлический привод строительных, дорожных и коммунальных машин : каталог-справочник – М. : МАШМИР, 1997.
42. Гидро- и пневмопривод и его элементы. Рынок продукции : каталог / Сост. : Ю. И. Абанкин и др. – М. : Машиностроение, 1992. – 232 с.
43. Гидроприводы сельскохозяйственных машин / И. А. Немировский, Л. П. Середа, А. Ф. Маркин, В. В. Яницкий ; под ред. И. А. Немировского. – К. : Техника, 1979. – 137 с.
44. Гидросила : Аксиально-поршневые насосы и гидромоторы // Каталог ЗАТ «Гидросила ГРУП» // Режим доступа : <http://www.hydrasila.com/files/catalog/ru-catalog-11.pdf>.
45. Григоров О. В. Гідравлічний привід підйомно-транспортних, будівельних та дорожніх машин : навч. посібник / О. В. Григоров. – Харків : НТУ «ХП», 2005. – 264 с.
46. Губарев А. П. Структурно-модульный синтез цикловых систем гидро- и пневмопривода : дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.03 / Национальный технический ун-т Украины «Киевский политехнический ин-т». – К., 2004. – 381 с.
47. Гуревич Ю. Я. Исследование динамики гидропривода с регулируемым насосом / Ю. Я. Гуревич // Пневматика и гидравлика. – М. : Машиностроение. – 1981. – Вып. 3. – С. 65–76.
48. Гуревич Ю. Я. Уточнение параметров гидропривода с регулируемым насосом на основе исследования его устойчивости / Ю. Я. Гуревич, О. В. Косовцов ; под общ. ред. Е. В. Герц. // Пневматика и гидравлика : Приводы и системы управления. – М. – 1990. – Вып. 15. – С. 89–99.
49. Данилов Ю. А. Аппаратура объемных гидроприводов / Ю. А. Данилов, Ю. Л. Колпаковский, Ю. Г. Колпаков – М. : Машиностроение, 1990. – 271 с.
50. Дерібо О. В. Імітаційне моделювання електрогідравлічного слідкувального приводу з керуванням зусиллям на виконавчому органі / О. В. Дерібо, Ж. П. Дусанюк, С. В. Репінський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 5. – С. 108–114.
51. Динамічні характеристики електрогідравлічного слідкувального приводу з керуванням зусиллям на вихідному органі / О. В. Дерібо, Ж. П. Дусанюк, С. В. Репінський, А. О. Парадний, В. Г. Пилявець // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 4. – С. 118–123.



52. Добронравов С. С. Строительные машины и основы автоматизации : учеб. для строит. вузов. / С. С. Добронравов, В. Г. Дронов. – М. : Высш. шк., 2001. – 575 с.

53. Дусанюк Ж. П. Вплив параметрів довгого трубопроводу на характеристики руху вихідної ланки гідроприводу / Ж. П. Дусанюк, С. В. Репінський, С. В. Дусанюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – № 5. – С. 73–77.

54. Зайченко И. З. Динамика аксиальных роторно-поршневых насосов / И. З. Зайченко, А. Д. Болотянский ; под общ. ред. Е. В. Герц. // Пневматика и гидравлика : Приводы и системы управления. – М. – 1973. – Вып. 3. – С. 277–291.

55. Иванов И. В. Развитие тракторных гидроприводов / И. В. Иванов, Д. Е. Флеер, А. Б. Халецкий // Приводная техника. – 2006. – № 1 (59). – С. 27–34.

56. Иванов М. Е. Гидропривод сваепогружающих и грунтоуплотняющих машин / М. Е. Иванов, И. Б. Матвеев, Р. Д. Искович-Лотоцкий [и др.]. – М. : Машиностроение, 1977. – 174 с.

57. Искович-Лотоцкий Р. Д. Машины вибрационного и виброударного действия / Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. Б. Матвеев, В. А. Крат. – К. : Техника, 1982. – 208 с.

58. Иванов М. І. Імітаційні дослідження хвильових процесів у довгих гідравлічних лініях гідросистем сільськогосподарських машин / М. І. Иванов, С. В. Репінський, С. В. Дусанюк // Вибрации в технике и технологиях. – 2003. – № 4 (30). – С. 69–72.

59. Каталог «Насосы и моторы». NY02-8001/RU / Parker Hannifin // – Режим доступу : [http://parker-hannifin.ru/up/catalog/parker\\_pumps\\_and\\_motors\\_NY02-8001.pdf](http://parker-hannifin.ru/up/catalog/parker_pumps_and_motors_NY02-8001.pdf).

60. Каталоги Bosch Rexroth / Bosch Rexroth // – Режим доступу : <https://www.boschrexroth.com/ics/Vornavigation/VorNavi.cfm>.

61. Каталоги Eaton / Eaton // – Режим доступу : <http://www.eaton.com/Eaton/ProductsServices/Hydraulics/index.htm>.

62. Каталоги Sauer-Danfoss / Sauer-Danfoss // – Режим доступу : <http://powersolutions.danfoss.com/products/piston-pumps-and-motors>.

63. Козлов Л. Г. Вдосконалення систем керування гідроприводів з LS-регулюванням : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.03 / Козлов Леонід Геннадійович. – Вінниця, 2000. – 320 с.

64. Козлов Л. Г. Наукові основи розробки систем гідроприводів маніпулятора з адаптивним регулятором на основі нейромереж для

мобільних робочих машин : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.02 / Козлов Леонід Геннадійович. – Вінниця, ВНТУ, 2015. – 421 с.

65. Колебания элементов аксиально-поршневых гидромашин / К. В. Фролов, А. С. Гельман, А. В. Синев, Ф. А. Фурман. – М. : Машиностроение, 1973. – 280 с.

66. Кондаков Л. А. Перспективы развития аксиально-поршневых гидромашин / Л. А. Кондаков // Привод и управление. – 2001. – № 3. – С. 2–5.

67. Кондаков Л. А. Машиностроительный гидропривод / Л. А. Кондаков, Г. А. Никитин, В. Н. Прокофьев [и др.] ; под. ред. В. Н. Прокофьева. – М. : Машиностроение, 1978. – 495 с.

68. Коробочкин Б. Л. Динамика гидравлических систем станков / Б. Л. Коробочкин. – М. : Машиностроение, 1976. – 240 с.

69. Косовцов О. В. Исследование гидропривода с регулируемым насосом, управляемым по давлению : дис. ... канд. техн. наук. / О. В. Косовцов. – М., 1973. – 143 с.

70. Крассов И. М. Гидравлические элементы в системах управления. / И. М. Крассов. – [2-е изд., перераб.] – М. : Машиностроение, 1967. – 254 с.

71. Кулик В. К. Стабилизация рабочих подач гидроприводов с регулятором скорости на входе / В. К. Кулик. // Станки и инструмент. – 1973. – № 9. – С. 16–17.

72. Лещенко В. А. Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением / В. А. Лещенко. – М. : Машиностроение, 1975. – 283 с.

73. Любимов Б. А. Новые направления развития комплексных гидроприводов мобильных машин / Б. А. Любимов, Д. Е. Флеер // Тракторы, сельхозмашины, двигатели, агрегаты и узлы. – М. : ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш, 1981. – Вып. 8. – 68 с.

74. Малинский И. М. Объединенные гидравлические системы с/х тракторов / И. М. Малинский, С. Д. Ярош, Д. Е. Флеер. – М. : ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш, 1981. – Вып. 6. – 36 с.

75. Математична модель пропорційної електрогідравлічної системи керування регульованим насосом / С. В. Репінський, Д. О. Лозінський, М. П. Кучеренко, О. О. Ланова // Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012) : XI міжнар. наук.-техн. конф., 9–11 жовтня 2012 р. : тези доп. – Вінниця, 2012. – С. 171–172.

76. Математична модель пропорційної електрогідравлічної системи керування регульованим насосом / С. В. Репінський,

Д. О. Лозінський, М. П. Кучеренко, О. О. Ланова // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 2. – С. 105–109.

77. Машиностроение. Энциклопедия. Том IV-9. Строительные, дорожные и коммунальные машины. – М. : Машиностроение, 2005.

78. Машиностроение. Энциклопедия. Том IV-15. Колёсные и гусеничные машины. – М. : Машиностроение, 1997.

79. Моделирование гидравлической системы экзоскелетона / Г. К. Боровин, А. В. Костюк, Д. Сит, В. В. Ястребов // Математическое моделирование. – 2006. – Т. 18, № 10. – С. 39–54.

80. Насосы аксиально-поршневые регулируемые типа НА. Техническое описание / Харьковское ОАО «Гидропривод» – Харьков, 2004.

81. Насосы аксиально-поршневые регулируемые типа НА. Устройство и работа насосов и их составных частей / Харьковское ОАО «Гидропривод» – Харьков, 2004.

82. Немировский И. А. Графо-аналитический метод расчёта гидропривода / И. А. Немировский. – М. : Машиностроение, 1968. – 170 с.

83. Немировский Ю. А. Дроссельные регуляторы скорости / Ю. А. Немировский, Ю. М. Дивеев // Гидропривод и гидропневмоавтоматика : сб. науч. трудов. – К. : Техника, 1970. – Вып. 6. – С. 52–60.

84. Николенко И. В. Методологические основы проектирования аксиально-поршневых гидромашин высокого технического уровня : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.02 / Николенко Илья Викторович. – О., 2006. – 400 с.

85. Николенко И. В. Математическое моделирование рабочего процесса в гидроприводе на основе регулируемых аксиально-поршневых гидромашин / И. В. Николенко, А. Н. Рыжаков // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2015. – № 9. – С. 17–31.

86. Нейман В. Г. Гидроприводы авиационных систем управления / В. Г. Нейман. – М. : Машиностроение, 1973. – 200 с.

87. Нейман В. Г. Статистические и динамические характеристики дроссельного гидропривода с насосом переменной производительности / В. Г. Нейман // Известия вузов. Серия «Машиностроение». – 1966. – № 7. – С. 80–86.

88. Новое в гидросистемах тракторов фирмы Кейс (США) / Экспресс-инф. Серия. «Тракторы, самоходные шасси, двигатели, агрегаты и узлы» – М. : ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш, 1981. – 5 с.

89. Новые тракторные гидросистемы на базе регулируемых насосов / Экспресс-инф. Серия. «Тракторы, самоходные шасси, двигатели, агрегаты и узлы» – М. : ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш, 1980. – 6 с.

90. Основы общей теории сельскохозяйственного гидропривода : под. ред. И. В. Фрумкиса. – М. : Колос, 1978. – 240 с.

91. Основы теории и конструирования объемных гидropередач / А. В. Кулагин, Ю. С. Демидов, В. Н. Прокофьев, А. М. Кондаков. – М. : Высшая школа, 1967. – 399 с.

92. Оптимізація конструктивних параметрів комбінованого регулятора подачі аксіально-поршневого регульованого насоса / Ю. А. Буренніков, Л. Г. Козлов, С. В. Репінський, О. В. Поліщук // Промислова гідравліка і пневматика. – 2012. – № 1(35). – С. 73–77.

93. Пат. 48277 UA, МПК<sub>8</sub> F04B 1/26 Система керування регульованим насосом / Буренніков Ю. А., Козлов Л. Г., Репінський С. В. ; заявник та патентовласник Вінницький національний технічний університет Міністерства освіти і науки України. – № u200909893 ; заявл. 28.09.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5.

94. Пат. 5.297.941 США, МПК F04B 49/00 Control system for hydraulic pumps of the variable displacement type / An H. Park, Samsung Heavy Industries Co. – заявл. 23.11.1992 ; опубл. 29.03.1994.

95. Пат. 5.567.123 США, МПК F04B 49/08 Pump displacement control for a variable displacement pump / Dale B. Childress, Noah D. Manring, Caterpillar Inc. – заявл. 12.09.1995 ; опубл. 22.10.1996.

96. Пат. 6.033.188 США, МПК F04B 1/26 Means and method for varying margin pressure as a function of pump displacement in a pump with load sensing control / Jeffrey A. Baldus, State Center; David D. Dirks; Kerry G. Geringer, both of Ames, all of Iowa, Sauer Inc. – заявл. 27.02.1998 ; опубл. 07.03.2000.

97. Пат. 6.371.733 B1 США, МПК F04B 1/26 Pump with hydraulic load sensor and controller / Wesley E. Renfro, Accuspray Inc. – заявл. 22.05.2000 ; опубл. 16.04.2002.

98. Пат. 6.874.318 B1 США, МПК F16D 31/02 Automatic remote pressure compensation in an open circuit pump / Ian J.C. MacLeod, Sauer-Danfoss Inc. – заявл. 18.09.2003 ; опубл. 05.04.2005.

99. Покостин В. И. ОАО «Шахтинский завод "Гидропривод"». Путь развития / В. И. Покостин // Строительные и дорожные машины. – 2000. – № 2.

100. Полозов А. В. Динамика стабилизированного гидропривода / А. В. Полозов // Вестник машиностроения. – 1975. – № 2. – С. 10–15.

101. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем / Д. Н. Попов. – М. : Машиностроение, 1976. – 424 с.
102. Приводы объемно-дроссельного регулирования для оборудования с числовым программным управлением / В. А. Лещенко, А. Ф. Богданов, В. В. Громова [и др.] // Вестник машиностроения. – 1973. – № 11. – С. 18–22.
103. Прокофьев В. Н. Аксиально-поршневой регулируемый гидроривод / В. Н. Прокофьев, Ю. А. Данилов, Л. А. Кондаков [и др.] ; под ред. В. Н. Прокофьева. – М. : Машиностроение, 1969. – 496 с.
104. Развитие конструкций тракторных гидросистем / Обзорная инф. Серия: «Тракторы и двигатели». – М. : ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш, 1983. – 42 с.
105. Раннев А. В. Создание гидравлических экскаваторов – крупнейшее достижение в развитии землеройной техники / А. В. Раннев // Строительные и дорожные машины. – 1981. – № 5. – С. 5–7.
106. Раннев А. В. Развитие конструкций одноковшовых экскаваторов / А. В. Раннев // Строительные и дорожные машины. – 1993. – № 3. – С. 2–6.
107. Репінський С. В. Дослідження роботи системи керування насосом змінної продуктивності з автоматичним регулятором комбінованого керування / С. В. Репінський // Інформатика та механіка : VI міжнар. наук.-техн. конф. молодих науковців, 6-8 травня 2008 р. : тези доп. – Хмельницький : Хмельницький національний університет, 2008. – С. 72–73.
108. Репінський С. В. Визначення моменту опору планшайби аксіально-поршневого насоса засобами математичного планування експерименту / С. В. Репінський // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 5. – С. 46–51.
109. Репінський С. В. Система керування аксіально-поршневого регульованого насоса з профільованим вікном золотника комбінованого регулятора подачі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / Репінський Сергій Володимирович. – Вінниця, 2011. – 20 с.
110. Репінський С. В. Система керування аксіально-поршневого регульованого насоса з профільованим вікном золотника комбінованого регулятора подачі : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / Репінський Сергій Володимирович. – Вінниця, 2011. – 248 с.
111. Репінський С. В. Сучасний технічний рівень і схеми систем керування регульованих насосів / С. В. Репінський, М. П. Кучеренко,

О. О. Ланова // Тези студентських доповідей. – Вінниця, 2012 – Режим доступу: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2012/inmt/txt/kucherenko.pdf>.

112. Рустанович А. В. Системы гидропривода полноповоротных экскаваторов : обзор. / А. В. Рустанович, А. Я. Ландстон. – Вып. 3. – М. : ЦНИИТЭ строймаш, 1981. – 52 с.

113. Рустанович А. В. Развитие гидросистем одноковшовых экскаваторов / А. В. Рустанович, А. А. Акинфиев // Строительные машины. – М. : ЦНИИТЭИ стройдормаш, 1988. – Вып. 3. – 56 с.

114. Рустанович А. В. Гусеничные экскаваторы с гидрооборудованием фирмы Mannesmann Rexroth / А. В. Рустанович, Г. А. Немчинов, В. Г. Штуклер // Строительные и дорожные машины. – 1993. – № 11–12. – С. 7–8.

115. Свешников В. К. Аксиально-поршневые насосы в современных гидроприводах / В. К. Свешников // Гидравлика и пневматика. – 2005. – № 18. – С. 8–12.

116. Свешников В. К. Гидрооборудование: Международный справочник. Номенклатура, параметры, размеры, взаимозаменяемость : в 3 кн. / В. К. Свешников. – М. : Техинформ. – Кн. 1. Насосы и гидродвигатели. – 2001. – 360 с.

117. Свешников В. К. Станочные гидроприводы : справочник / В. К. Свешников. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2008. – 640 с.

118. Соболев И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И. М. Соболев, Р. Б. Стадников. – М. : Наука, 1981. – 110 с.

119. Современное состояние и перспективы развития гидроприводов в тракторах / Тракторы и двигатели. – М. : ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш, 1989. – Вып. 4. – 48 с.

120. Сосонкин В. Л. Дискретная гидроавтоматика / В. Л. Сосонкин. – М. : Машиностроение, 1972. – 164 с.

121. Тихенко В. Н. Использование дополнительных силовых гидросвязей для повышения эффективности гидравлических приводов / В. Н. Тихенко // Труды Одесского политехнического университета. – 2000. – № 3(12). – С. 20–24.

122. Токарь И. Я. Влияние параметров системы управления на динамику насоса переменной производительности / И. Я. Токарь, М. М. Тумаркин, М. М. Шкловский // Вестник машиностроения. – 1980. – № 9. – С. 12–16.

123. Трифонов О. Н. Лекции по анализу устойчивости нелинейных гидроавтоматических систем и аппаратов / О. Н. Трифонов. – М. : Мосстанкин, 1971. – 60 с.

124. Тумаркин М. М. К динамическому синтезу дроссельного гидропривода систем управления / М. М. Тумаркин // Машиноведение. – 1982. – № 3. – С. 27–33.

125. Флеер Д. Е. Гидросистемы, чувствительные к нагрузке, с приоритетной работой потребителей первоочередного действия / Д. Е. Флеер, А. Б. Стесин // Тракторы, самоходные шасси, двигатели, агрегаты и узлы. – М. : ЦНИИТЭИ тракторсельхозмаш, 1980. – Вып. 17. – 8 с.

126. Флеер Д. Е. Современное состояние и тенденции развития гидросистем тракторов и сельхозмашин. Аналитический обзор / Д. Е. Флеер. – Минск : НИО РБ, 1997.

127. Фрумкис И. В. Гидроприводы машино-тракторных поездов большой мощности / И. В. Фрумкис // Тракторы и сельхозмашины. – 1981. – № 5. – С. 6–9.

128. Хохлов В. А. Электрогидравлические следящие системы / В. А. Хохлов, В. Н. Прокофьев, Н. А. Борисова [и др.] ; под. ред. В. А. Хохлова. – М. : Машиностроение, 1971. – 431 с.

129. Цуханова Е. А. Динамический синтез дроссельных управляющих устройств гидроприводов / Е. А. Цуханова/ – М. : Наука, 1978. – 254 с.

130. Черных И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений / И. В. Черных/ – М. : Диалог, МИФИ, 2003.

131. Чухчин Н. Ф. Основные тенденции развития тракторной техники / Н. Ф. Чухчин // Тракторы и сельхозмашины. – 1982. – № 6. – С. 9–11.

132. Beitrag E. Load-sensing Steuerung : Anwendungen und Ausbaustufen / E. Beitrag // Der Konstrukteur. – 1988. – № 5. – P. 60–64.

133. BOSCH Elektrohydraulische Steuerungen für Mobilwegeventile der Baureihen IB12 und SB23. – Stuttgart : Robert Bosch GmbH, 1989. – 18 p.

134. Brucle F. Pumpenregelungen an Hehrkreis-systemen. Vergleich der inergiebilanz am Beispiel eines Hydraulic-Baggers / F. Brucle // Olhydraul. und Pneum. – 1982. – № 2. – P. 85–93.

135. Burennikov Yu. Modelling of the variable-displacement pump control system using MATLAB Simulink software package / Yu. Burennikov, L. Kozlov, S. Repinskiy, G. Kozlova // Proceedings of the

International scientific and engineering conference «TEHNOMUS XIII» – Suceava, 2005. – P. 516–520.

136. Burennikov Yu. Dynamics of the hydraulic drive control system with variable-displacement pump / Yu. Burennikov, L. Kozlov, S. Repinskiy // Buletinul Institutului Politehnic din Iași. – 2007. – Tomul LIII (LVII), Fasc. 4. – P. 23–30.

137. Burennikov Yu. A. Metrological characteristic of the test rig with automatic regesting of the proportionally-controlled hydraulic drive / Yu. A. Burennikov, L. G. Kozlov, D. O. Lozinsky, O. V. Petrov, S. V. Repinskiy // Buletinul Institutului Politehnic din Iași. – 2009. – Tomul LV (LIX), Fasc. 1. – P. 125–130.

138. Burennikov Yu. A. Dynamics of hydraulic drive with variable pump on the basis of flow regulator / Yu. A. Burennikov, L. G. Kozlov, S. V. Repinskiy // Buletinul Institutului Politehnic din Iași. – 2009. – Tomul LV (LIX), Fasc. 1. – P. 131–136.

139. Burennikov Yu. A. Experimental characteristics of the hydraulic drive with variable-displacement pump / Yu. A. Burennikov, L. G. Kozlov, S. V. Repinskiy, O. V. Petrov // Proceedings of the International scientific and engineering conference «TEHNOMUS XV» – Suceava, 2009. – P. 485–491.

140. Burennikov Yu. Optimization of the design parameters of a combined flow regulator for the variable axial-piston pump / Yu. Burennikov, L. Kozlov, S. Repinskiy // Buletinul Institutului Politehnic din Iași. – 2011. – Tomul LVII (LXI), Fasc. 3. – P. 219–228.

141. Campioli G. Sistemi Load Sensing / G. Campioli // Oleodinamica – pneumatica. – 1987. – №2. – P. 108–112.

142. Franz Weingarten Аксиально-поршневые насосы / Franz Weingarten // Гидравлика и пневматика. – 2004. – № 15. – С. 10–14.

143. Garbess H. Belastungsgrossen und Leistungsbilanzen von Schlepperhydraulik-Systemen / H. Garbess // Olhydraul. und Pneum. – 1996. – № 11. – P. 815–820.

144. Gluth Manfred. Hydraulik Systeme in Baggern / Gluth Manfred, Wallenhorst // Neue Landschaft. – 1990. – № 35. – P. 714–720.

145. Linde Hydraulics : HPR-02. Variable pumps for closed loop operation : каталог / Фирма Linde Hydraulics. – Режим доступа : <http://www.linde-hydraulics.com/en-gb/catalogue/range.aspx>.

146. Linde Hydraulics : HPR-02. Self-regulating pump for open loop operation : каталог / Фирма Linde Hydraulics. – Режим доступа : <http://www.linde-hydraulics.com/en-gb/catalogue/range.aspx>.



147. Hydraulic-Training Axial Piston Units. Basic Principles / Mannesmann Rexroth. Brueninghaus Hydromatik, 1999.
148. Khatti Ramkishan. Load-sensitive hydraulic system for Allise-Chalmers models 7030 and 7050 agricultural tractors / Khatti Ramkishan // SAE. Prepr. – 1973. – № 730860. – P. 32–38.
149. Kim S. D. Stability analysis of a load-sensing hydraulic system / S. D. Kim, H. S. Cho, C. O. Jee // Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1988. – V. 202. – № A2. – P. 21–28.
150. Klotzbucher W. Energy losses in hydraulic systems on agricultural tractors / W. Klotzbucher // 7<sup>th</sup> International Fluid Power Symposium. – 1986. – P. 333–342.
151. Kordak R. Verleihung der Ehrendor torwürde / R. Kordak // Technische Universität Dresden, 1997.
152. Mooren Wilhelm. Excavating for the 90 s / Mooren Wilhelm // Constr. Industry. – 1990. – № 16. – P. 22–28.
153. Shelley T. R. Load-sensing using the egromatic valve system / T. R. Shelley, F. I. Plant // Hydraulic and Air Engineering. – 1985. – № 13. – P. 14–15.
154. Strohl Hubert. Gestaltung von Hydraulikantrieben zur Erhöhung der I Energieeconomie / Strohl Hubert // Wiss Z. Techn. Hochsch. – 1986. – Heft 7. – P. 4–7.
155. Van Hamme Th. Entwicklungstendenzen der Hydrostalik in Baumaschinen beobachten auf der Bauma 86 / Th. Van Hamme, W. Rohrs // Ölhydraul. und Pneum. – 1986. – 30, M. – P. 441–446.
156. Weishaupt E. Energiesparende elektrohydrau-lische Schaltungskonzepte / E. Weishaupt, B. Völker // Ölhydraulik und Pneumatik. – 1995. – № 2.
157. Zane Bernd. Electrohydraulisches load-sensing / Zane Bernd, Schmitz Rolf, Eschweiler Markus // Ölhydraulik und Pneumatik. – 1990. – № 8. – P. 548–553.
158. Zeiger G. Dynamic analysis of an axial-piston pump swashplate control / G. Zeiger, A. Akers // Proc. Inst. Mech. Engrs. – 1986. – V. 200, № C1. – P. 24–28.

*Наукове видання*

**Сергій Володимирович Репінський  
Леонід Геннадійович Козлов  
Юрій Анатолійович Буренніков**

**КЕРУВАННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ НАСОСІВ  
В ГІДРОПРИВОДАХ,  
ЧУТЛИВИХ ДО НАВАНТАЖЕННЯ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено С. Репінським

Підписано до друку 5.09.2016 р.  
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 11,55.  
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № В2016-23

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32.

**publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.**

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.  
21021, м. Вінниця, вул. Порики, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.