



POLITECHNIKA
GDAŃSKA

RYSZARD JASIŃSKI

FUNKCJONOWANIE ZESPOŁÓW
NAPĘDU HYDRAULICZNEGO
MASZYN W NISKICH
TEMPERATURACH OTOCZENIA

GDAŃSK 2018

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Janusz T. Cieśliński

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

REDAKTOR SERII

Krzysztof J. Kaliński

RECENZENCI

Andrzej Balawender

Ryszard Dindorf

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

PROJEKT OKŁADKI

Jolanta Cieślawska

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<http://www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog>
zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.edu.pl

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej
Gdańsk 2018

ISBN 978-83-7348-721-5

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	7
1. STAN WIEDZY DOTYCZĄCEJ ROZRUCHU UKŁADÓW HYDRAULICZNYCH W NISKICH TEMPERATURACH OTOCZENIA	11
1.1. Wprowadzenie	11
1.2. Przegląd literatury dotyczącej eksploatacji zespołów i układów hydraulicznych w niskich temperaturach otoczenia	12
2. TEZA I CELE PRACY	18
2.1. Teza pracy	18
2.2. Główne cele pracy	18
3. KLASYFIKACJA ROZRUCHÓW UKŁADÓW HYDRAULICZNYCH W NISKICH TEMPERATURACH OTOCZENIA	19
3.1. Rozruch oziębionego układu hydraulicznego zasilanego olejem o tej samej temperaturze	20
3.2. Rozruch oziębionego układu hydraulicznego w warunkach szoku termicznego	20
3.3. Podsumowanie	22
4. ZJAWISKA WYSTĘPUJĄCE PODCZAS ROZRUCHU ZESPOŁÓW I UKŁADÓW HYDRAULICZNYCH W NISKICH TEMPERATURACH OTOCZENIA	23
4.1. Wpływ ciśnienia i temperatury na własności cieczy hydraulicznych	24
4.2. Wpływ obniżonej temperatury na działanie układów hydraulicznych	27
4.3. Podsumowanie	28
5. BILANS CIEPLNY OZIĘBIONYCH ZESPOŁÓW HYDRAULICZNYCH ZASILANYCH CIEPŁĄ CIECZĄ HYDRAULICZNĄ	29
5.1. Bilans cieplny wyporowej maszyny hydraulicznej (pompy, silnika) podczas rozruchu w warunkach szoku termicznego	32
5.2. Bilans cieplny oblodzonej pompy hydraulicznej podczas rozruchu w warunkach szoku termicznego	35
5.3. Bilans cieplny pompy hydraulicznej, w której wpływający strumień cieczy dzielony jest na strumień wypływający i strumień przecieków	37
5.4. Proces nagrzewania siłownika hydraulicznego podczas rozruchu w niskich temperaturach otoczenia	39
5.4.1. Bilans energii siłownika podczas wysuwania tłoczyska	41
5.5. Bilans cieplny oziębionego rozdzielacza suwakowego podczas rozruchu układu w warunkach szoku termicznego	42
5.6. Podsumowanie	44
6. CHARAKTERYSTYCZNE CECHY BUDOWY ZESPOŁÓW HYDRAULICZNYCH I KLASYFIKACJA ZJAWISK W WĘZŁACH KONSTRUKCYJNYCH ZE WZGLĘDU NA EKSPLOATACJĘ W NISKICH TEMPERATURACH OTOCZENIA	45
7. METODY OKREŚLANIA LUZU POMIĘDZY WSPÓLPRACUJĄCYMI ELEMENTAMI ZESPOŁU HYDRAULICZNEGO W WARUNKACH SZOKU TERMICZNEGO	48
7.1. Zmiana efektywnego luzu między współpracującymi elementami zespołów hydraulicznych podczas rozruchu w warunkach szoku termicznego	48
7.2. Metody określania luzu pomiędzy współpracującymi elementami zespołu hydraulicznego w warunkach szoku termicznego	52
7.3. Podsumowanie	57

8. STANOWISKA DO BADANIA UKŁADÓW I ZESPOŁÓW HYDRAULICZNYCH W NISKICH TEMPERATURACH OTOCZENIA	58
8.1. Stanowisko do badań zespołów hydraulicznych w warunkach szoku termicznego	58
8.2. Stanowisko do badania układu hydraulicznego z silnikiem hydraulicznym i rozdzielaczem proporcjonalnym	61
8.3. Stanowisko do badania układu hydraulicznego z rozdzielaczem sterowanym elektrohydraulicznie i pompą zębatą	64
8.4. Stanowisko do badania modeli i zespołów hydraulicznych	64
8.4.1. Stanowisko do badania pompy hydraulicznej	64
8.4.2. Stanowisko do badania modeli wybranych węzłów maszyn hydraulicznych tłoczkowych	65
8.4.3. Stanowisko do badania układu hydraulicznego z serwozaworem	66
8.4.4. Stanowisko do badania układu hydraulicznego z siłownikiem hydraulicznym	66
8.5. Podsumowanie	67
9. ANALIZA WPLYWU BUDOWY POMP WYPOROWYCH NA ICH DZIAŁANIE W NISKICH TEMPERATURACH OTOCZENIA	69
9.1. Pompy zębate	69
9.2. Pompy wielotłoczkowe promieniowe	71
9.3. Pompy wielotłoczkowe osiowe	75
9.3.1. Rozrząd pomp tłoczkowych osiowych	76
9.3.2. Zespół tłoczek–stopka hydrostatyczna	77
9.4. Podsumowanie	80
10. BADANIE ZJAWISK W WĘZŁACH POMP TŁOCZKOWYCH W WARUNKACH SZOKU TERMICZNEGO	81
10.1. Badanie węzła tłok–cylinder pompy wielotłoczkowej promieniowej	81
10.2. Podsumowanie	86
11. BADANIA POMP WIELOTŁOCZKOWYCH OSIOWYCH I ZĘBATYCH W WARUNKACH SZOKU TERMICZNEGO	87
11.1. Badanie pompy wielotłoczkowej osiowej z wychylną tarczą oporową P2/16	87
11.2. Badania pompy P1/27 w warunkach szoku termicznego	90
11.2.1. Efektywny luz między tłoczkiem a cylindrem pompy P1/27	93
11.2.2. Podsumowanie badań pompy wielotłoczkowej osiowej P1/27	95
11.3. Badania pomp zębatych w warunkach szoku termicznego	97
11.3.1. Podsumowanie	103
12. BADANIA SILNIKÓW HYDRAULICZNYCH W WARUNKACH SZOKU TERMICZNEGO	105
12.1. Badania silników orbitalnych w warunkach szoku termicznego	109
12.1.1. Badania silnika S2/169 w warunkach szoku termicznego	109
12.1.2. Porównanie wyników badań silników orbitalnych S2/162,9 i S2/169 w warunkach szoku termicznego	111
12.2. Badanie silnika tłokowego promieniowego S1/1000 w niskich temperaturach otoczenia ..	112
12.3. Podsumowanie	120
13. BADANIE SIŁOWNIKÓW HYDRAULICZNYCH W WARUNKACH SZOKU TERMICZNEGO	122
13.1. Badanie siłowników hydraulicznych dwustronnego działania w niskich temperaturach otoczenia	124
13.1.1. Wyniki badań siłownika hydraulicznego w warunkach szoku termicznego ...	126
13.2. Podsumowanie	133

14. BADANIE ZAWORÓW HYDRAULICZNYCH	135
14.1. Badania rozdzielacza sterowanego elektrohydraulicznie R1	137
14.1.1. Przykłady wyników badań rozdzielacza R1	139
14.2. Badanie rozdzielacza proporcjonalnego R2 w niskich temperaturach otoczenia	141
14.3. Badanie serwowozoru hydraulicznego	146
14.4. Podsumowanie	149
15. PODSUMOWANIE BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH ZESPOŁÓW HYDRAULICZNYCH URUCHAMIANYCH W WARUNKACH SZOKU TERMICZNEGO	150
16. ZJAWISKA I PROCESY NAGRZEWANIA OZIĘBIONEGO UKŁADU HYDROSTATYCZNEGO PODCZAS ROZRUCHU W NISKICH TEMPERATURACH OTOCZENIA ..	154
16.1. Niecałkowite wypełnienie komór roboczych pomp cieczą hydrauliczną podczas rozruchu w niskiej temperaturze otoczenia	158
16.2. Procesy nagrzewania w przekładni hydraulicznej	163
16.2.1. Procesy nagrzewania na przykładzie silnika satelitowego w układzie hydraulicznym otwartym	165
16.3. Układ otwarty ze sterowaniem dławieniowym	167
16.3.1. Badanie procesów nagrzewania na przykładzie układu z pompą zębatą, rozdzielaczem proporcjonalnym i silnikiem satelitowym	172
16.4. Przekładnia hydrostatyczna pracująca w obiegu zamkniętym	182
16.5. Podsumowanie	189
17. MODELOWANIE NAGRZEWANIA ZESPOŁÓW HYDRAULICZNYCH W WARUNKACH SZOKU TERMICZNEGO I WYZNACZANIE PARAMETRÓW ICH PRAWIDŁOWEGO DZIAŁANIA ZA POMOCĄ METOD ANALITYCZNEJ I SYMULACJI KOMPUTEROWEJ	191
17.1. Badania nagrzewania modeli i wyznaczenie dla nich współczynników przejmowania ciepła od oleju do powierzchni	191
17.2. Wyznaczenie współczynników przejmowania ciepła od oleju do powierzchni elementów badanych zespołów hydraulicznych	192
17.3. Metoda analityczna określania prawidłowego lub nieprawidłowego działania zespołu hydraulicznego uruchamianego w warunkach szoku termicznego na podstawie zmian luzu efektywnego	195
17.3.1. Określanie zdatności proporcjonalnego rozdzielacza R2 metodą analityczną.....	196
17.4. Metoda obliczeń numerycznych nagrzewania zespołów hydraulicznych w warunkach szoku termicznego i określanie ich zdatności w tych warunkach	199
17.5. Analiza procesów nagrzewania zespołów hydraulicznych w warunkach szoku termicznego metodą symulacji komputerowej i porównanie wyników z danymi eksperymentalnymi	199
17.5.1. Badania procesów nagrzewania elementów pompy P1/27 w warunkach szoku termicznego metodą symulacji komputerowej i porównanie wyników z danymi eksperymentalnymi	200
17.5.2. Badania procesów nagrzewania elementów rozdzielacza proporcjonalnego R2 w warunkach szoku termicznego metodą symulacji komputerowej i porównanie wyników z danymi eksperymentalnymi	207
17.6. Sposoby zapobiegania zanikowi efektywnego luzu między współpracującymi elementami zespołów hydraulicznych uruchamianych w warunkach szoku termicznego	212
17.7. Podsumowanie	217
18. PODSUMOWANIE	218
BIBLIOGRAFIA	223
Streszczenie w języku polskim	230
Streszczenie w języku angielskim	230