

Zbigniew Banet

KONSTRUKCYJNE BADANIA ZĘBNIKA NA WALE SPRĘŻYŚCIE
PODATNYM W ZASTOSOWANIU DO UKŁADÓW WIELODROŻNYCH

Streszczenie. Problemem badawczym jest realizacja wewnętrznego rozdziału obciążenia w trójdrożnej przekładni planetarnej NP-72.

Możliwość wyrównywania obciążenia na wszystkich drogach zamierza się osiągnąć przez zwiększenie liczby stopni swobody zębniaka centralnego oraz wieńca zewnętrznego. Celem pracy jest oryginalny sposób optymalizacji stanu obciążenia na poszczególnych drogach.

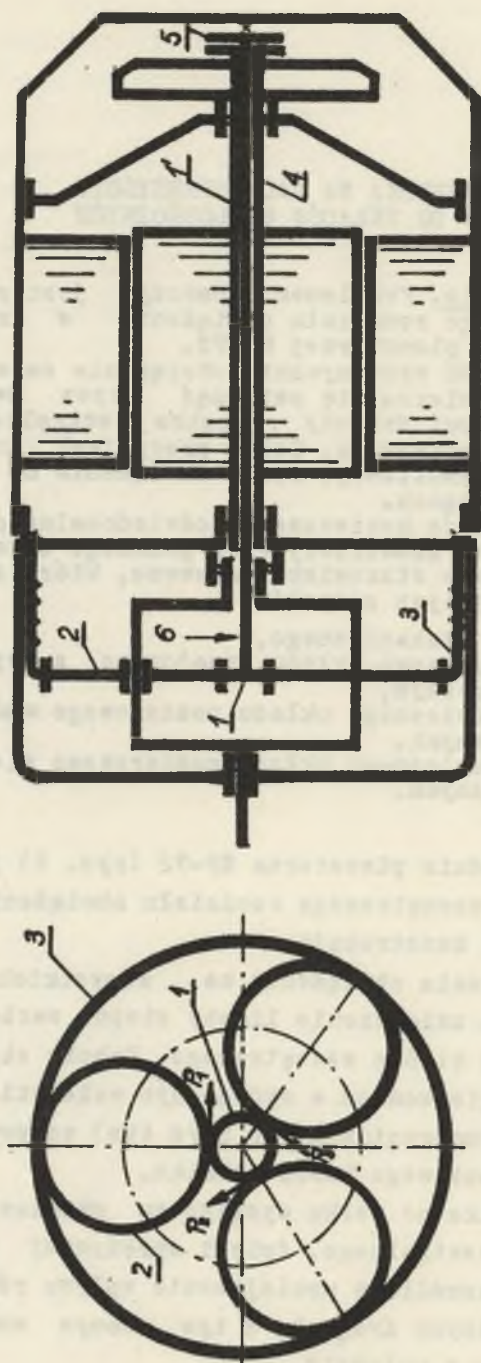
Z uwagi na konieczność doświadczonego wyznaczenia cech konstrukcyjnych podanego układu, zaprojektowano stanowisko badawcze, które składa się z następujących zespołów

- 1) układu mechanicznego,
- 2) elektrycznego układu napędowego z wyposażeniem elektrycznym,
- 3) elektronicznego układu pomiarowego wielkości mechanicznych,
- 4) elektronicznego układu pomiarowego wielkości akustycznych.

Trójdrożna przekładnia planetarna NP-72 (rys. 1) jest przykładem zrealizowania wewnętrznego rozdziału obciążenia zgodnie z pierwszą zasadą konstrukcji.

Możliwość wyrównywania obciążenia na wszystkich drogach chcemy osiągnąć przez zwiększenie liczby stopni swobody zębniaka centralnego oraz wieńca zewnętrznego. Zębniak stanowi część wałka osadzonego drugim końcem w wydrążonym wale silnika elektrycznego (silnik asynchroniczny typ SZJe 44a) co powinno zapewnić swobodę promieniowego ruchu zębniaka.

Wprowadzenie zębniaka na wałku wysięgowym zwiększa liczbę stopni swobody koła centralnego, dzięki sprężystej podatności zębniaka centralnego umożliwia zmniejszenie wpływu różnicy podziałek na poszczególnych drogach, a tym samym zmniejszenie nadwyżek dynamicznych w układzie.



Rys. 1. Schemat ideowy napędu planetarnego

Stopnie swobody pierścienia zewnętrznego uzyskano za pomocą podatnego usadowienia wieńca.

W przekładni NP-72 jest stosowane uzębienie proste o zróżnicowanej wysokości, które to uzębienie zostało poddane wstępnym badaniom na stanowisku badawczym KOPKM a wyniki badań opisano w Zeszycie Katedry Nr 21.

Oprócz tego wysunięto hipotezę, że dla optymalizacji stanu obciążenia należy stworzyć takie warunki zazębienia satelitów aby kolejne punkty przyporu na satelitach były względem siebie przesunięte.

Realizacja tej zasady wymaga jeszcze żmudnych poszukiwań analitycznych, tymczasem ograniczono się do wyznaczenia odpowiedniej liczby zębów na zespołach wirujących i to w ten sposób by uzyskać względne przesunięcie satelitów o kąt $\delta = 15'$

Przekładnia jest współosiową.

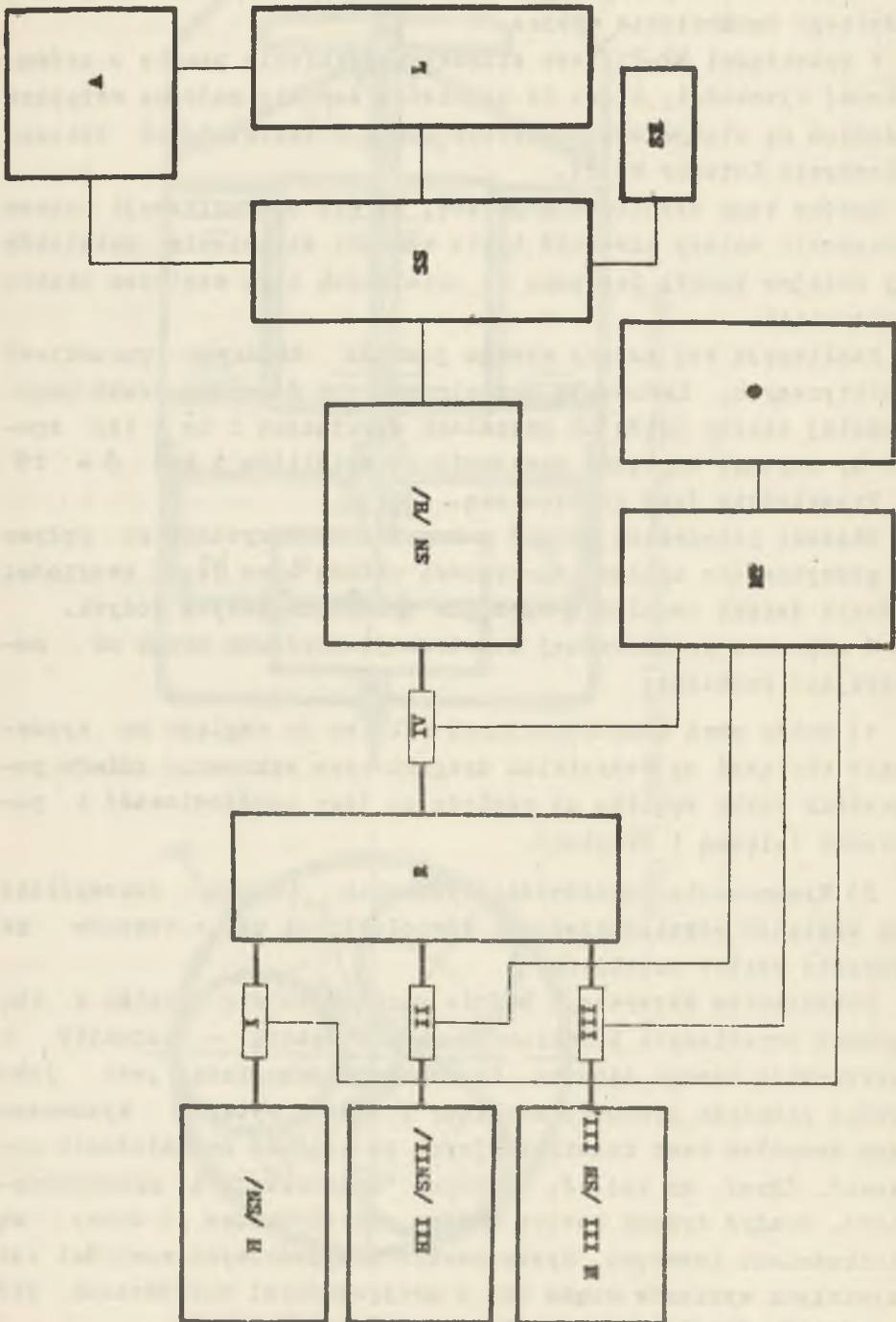
Stanowi integralną całość z napędem elektrycznym co wpływa na podwyższenie ogólnej sprawności układu oraz jego zwartości głównie dzięki usunięciu sprzęgła oraz dodatkowych łożysk.

W zakresie proponowanej konstrukcji zwrócono uwagę na następujące problemy:

1) Dobór cech konstrukcyjnych zębniaka ze względu na wyrównanie obciążeń na wszystkich drogach oraz wskazanie rodzaju połączenia wałka zębniaka ze względu na jego współosiowość i podatność (giętą i skrętną).

2) Wyznaczenie dokładności wykonania jarzma, szczególnie pod względem rozmieszczenia i równoległości osi - otworów na sworznie osiowe satelitów.

Przedmiotem obserwacji będzie zachowanie się zębniaka w warunkach określonych konstrukcją układu zębniak - satelity i konstrukcją samego zębniaka. Konstrukcja rozumiana jest jako "układ rozkładu gęstości struktur i stanów wytworu wyznaczonych zespołem cech konstrukcyjnych ze względu na działanie wytworu". (Prof. dr inż. J. Dietrych "Konstrukcja i konstruowanie"). Zważyć trzeba bowiem zawsze, że struktura i stany są wielkościami losowymi. Występowanie przypadkowych wartości rzeczywistych wymiarów wiąże się z przypadkowymi wartościami sił i momentów działających na poszczególnych drogach.



Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska badawczego

Na tym polega to co określone jest mianem procesu stochastycznego, w "Konstrukcji i Konstruowaniu" czytamy "zjawiskiem w procesie stochastycznym są układy stanowiące zbiór elementów mających losowe własności, przy czym do identyfikacji tych elementów można posłużyć się parametrem nielosowym".

Wszystkie elementy ruchu zębniaka: współrzędne i wektor prędkości jego środka masy, kąty określające położenie jego osi i wektor prędkości kątowej są funkcjami przypadkowymi czasu. W ten sposób konstrukcja przedstawia układ realizujący przekształcenie: funkcji przypadkowej - stanu obciążenia trzech dróg układu w inną funkcję przypadkową, a mianowicie: współrzędne i wektor prędkości środka masy zębniaka, kąty określające położenie jego osi i wektor prędkości kątowej.

Miara prawdopodobieństwa tego, że w ciągu określonego czasu obciążenie na poszczególnych drogach nie przekroczy określonej wartości stanowić będzie podstawę oceny miary trwałości i niezawodności przekładni planetarnej o powiększonym na drodze sprężystej liczbie stopni swobody.

Przy założeniu ergodyczności procesu zachodzącego w maszynie zadanie postanowiono rozwiązać poprzez:

- a) badanie korelacji i autokorelacji funkcji opisującej ruch zębniaka i stany obciążeń na poszczególnych drogach w funkcji konstrukcji:
- b) badanie "gładkości" krzywych opisujących proces.

Dla przeprowadzenia badań skonstruowano stanowisko badawcze (rys. 2) w skład którego wchodzi następujące zespoły:

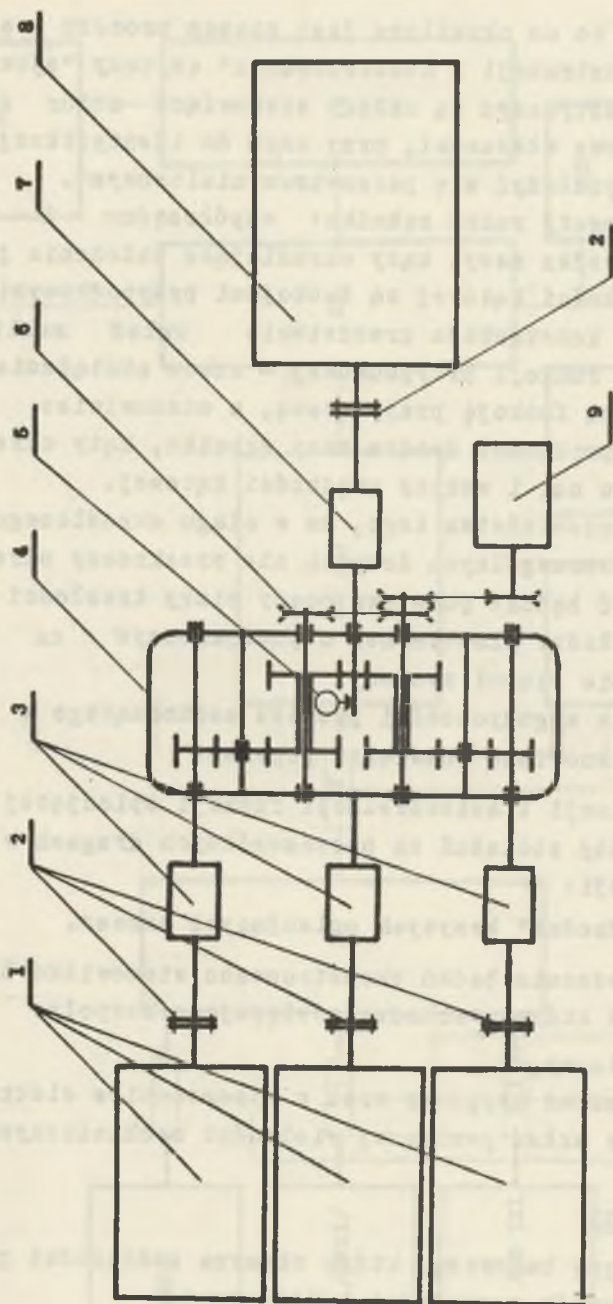
- 1) układ mechaniczny,
- 2) elektryczny układ napędowy wraz z wyposażeniem elektrycznym,
- 3) elektroniczny układ pomiarowy wielkości mechanicznych.

Układ mechaniczny

Stanowi maszynę badawczą, która stwarza możliwości porównawczej oceny elementów przekładni trójdrożnej.

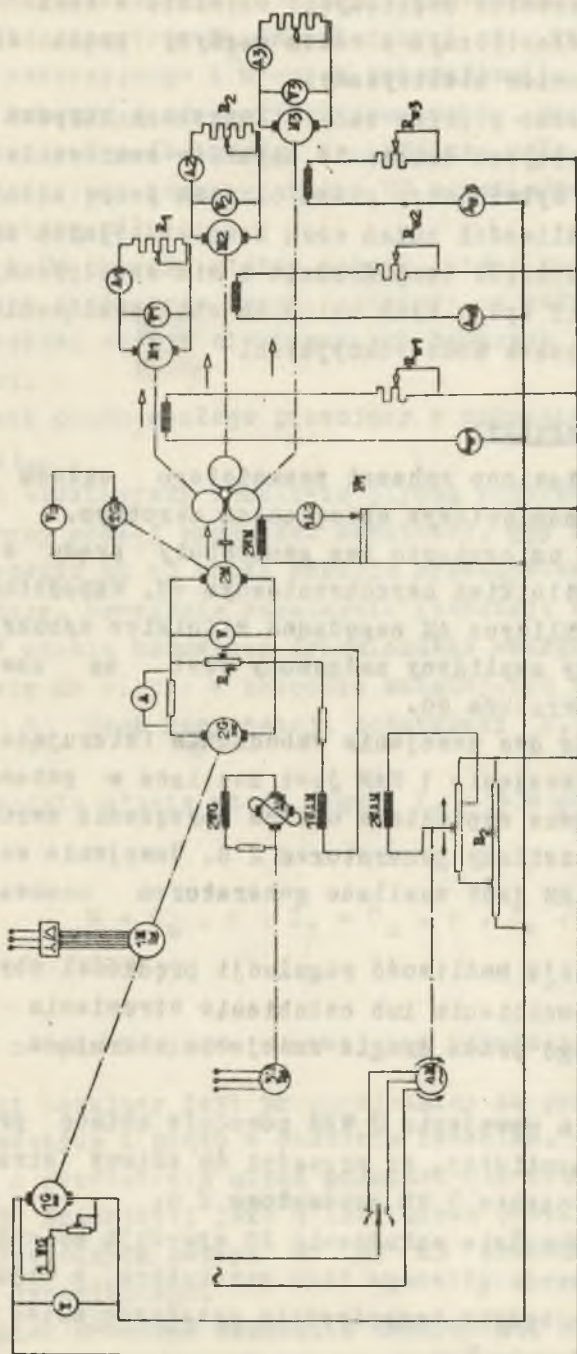
Działa w następujący sposób (rys. 3):

Z zębniaka centralnego napędzanego silnikiem prądu stałego następuje odbiór mocy poprzez trzy identycznie zbudowane drogi



Rys. 3. Schemat ideowy stanowiska badawczego

1 - silnik prądu stałego 7,5 kW, 2 - sprzężenie elektryczne, 3 - komutator $\phi 27$, 4 - przekładnia zębata, 5 - urządzenie do pomiaru drogi środka ozopa zębniaka centralnego
6 - przekładnia pasowa, 7 - komutator $\phi 17$, 8 - silnik prądu stałego 13 kW, 9 - silnik prądu stałego 0,8 kW



Rys. 4. Schemat elektrycznego układu napędowego

składające się z elementów uzębionych: ostatnie z nich połączono są sprzęgłem elastycznym z wałem maszyny prądu stałego działającej jako hamulec elektryczny.

Elementy te osadzone poprzez wały w łożyskach korpusu żeliwnego, których efektywne działanie zapewnia smarowanie obiegowe pod ciśnieniem wytworzonym przez olejową pompę zębatą.

Układ posiada możliwości zmian cech konstrukcyjnych zębownika centralnego oraz elementów bezpośrednio z nim współpracujących oraz pozwala określić wpływ tych zmian na stan obciążenia, co ma być podstawą wniosków konstrukcyjnych.

Elektryczny układ napędowy

Na rys. 4 przedstawiono schemat zamkniętego układu Ward-Leonarda z ujemnym napięciowym sprzężeniem zwrotnym.

Na wspólnym wale umieszczono dwa generatory prądu stałego 1G i 2G napędzane silnikiem asynchronicznym 1M. Wzbudniocą generatora 2G jest amplidyna AM napędzana silnikiem synchroicznym 3M. Obwód główny amplidyny załączony jest na uzwojenie wzbudzenia 2 WG generatora 2G.

Amplidyna posiada dwa uzwojenia wzbudzenia (sterujące): 1WAM i 2 WAM przy czym uzwojenie 1 WAM jest zasilane z potencjometru R_1 stanowi sztywne napięciowe ujemne sprzężenie zwrotne.

Silnik 2M jest zasilany generatorem 2 G. Uzwojenie wzbudzenia (2 WM) silnika 2M jest zasilane generatorem samowzbudnym prądu stałego 1G.

W układzie istnieje możliwość regulacji prędkości obrotowej silnika 2M przez wzmocnienie lub osłabienie strumienia magnetycznego wytwarzanego przez drugie uzwojenie sterujące amplidyny 2 WAM.

Zmiana strumienia uzwojenia 2 WAM powoduje zmianę prądu w uzwojeniu głównym amplidyny, co prowadzi do zmiany strumienia magnetycznego w uzwojeniu 2 WG generatora 2 G.

Zmiany prądu w obwodzie wzbudzenia 2G wywołują zmiany napięcia na zaciskach obwodu głównego tego generatora, a więc również silnika 2M, co będzie bezpośrednią przyczyną zmian jego prędkości obrotowej.

Do zmian strumienia wzbudzenia uzwojenia 2 WAM służy układ dwóch potencjometrów R_2 . W zależności od kierunku wirowania silnika rewersyjnego 4 M suwak potencjometru będzie przesuwany w jedną lub drugą stronę względem punktu, do którego przyłączony jest w sposób trwały. Na wspólnym wale z silnikiem 2 M umieszczony jest tachogenerator TG pozwalający mierzyć prędkość obrotową silnika.

Silnik 2M napędza giętny zębniak, który poprzez układ kół uzębionych przekazuje moment obrotowy na wałki połączone sprzęgłem z wałami maszyn elektrycznych będących hamulcami elektrycznymi.

(Silnik prądu stałego pracujący w zakresie hamowania dynamicznego).

Układ elektryczny umożliwia płynną regulację momentu hamującego przy stałej prędkości obrotowej, gdy uzwojenie twornika po odłączeniu go od sieci zostaje przełączone na odpowiednią rezystancję. Uzwojenie wzbudzenia pozostaje nie odłączone od sieci. W czasie hamowania dynamicznego energia elektryczna zamienia się na ciepło w obwodzie składającym się z rezystancji wirnika R_t oraz rezystancji dodatkowej R_d .

$$\text{W obwodzie płynie wtedy prąd } I_t = \frac{E}{R} = \frac{E}{R_t + R_d} = \frac{C \cdot \phi \cdot n}{R_t + R_d}$$

$$M = C_m \cdot \phi \cdot I_t = C_m \cdot k \cdot I_w \cdot I_t$$

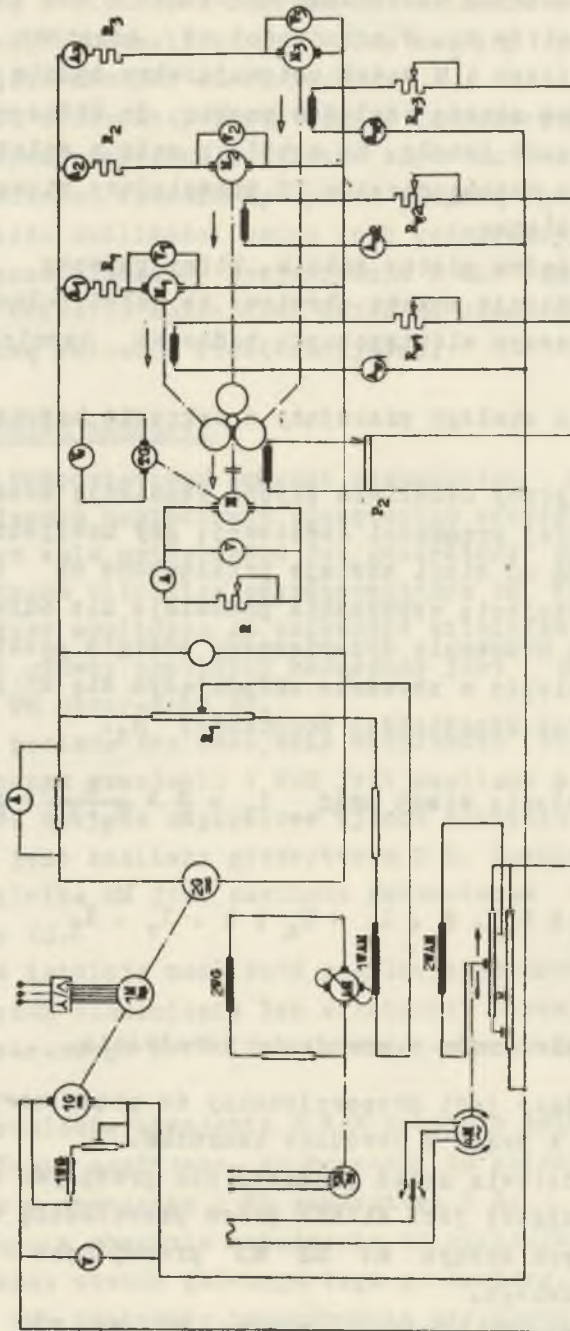
gdzie:

I_w - natężenie prądu w uzwojeniu wzbudzenia.

Moment hamujący jest proporcjonalny do prądu uzwojenia wzbudzenia maszyny i prądu w obwodzie twornika.

Rys. 4 przedstawia układ połączeń dla przepływu mocy od maszyny M pracującej jako silnik przez przekładnię mechaniczną do poszczególnych maszyn M1 M2 M3 pracujących w reżimie hamulca dynamicznego.

Stosunek momentów hamowania maszyn M1, M2, M3, może być zmieniany w szerokich granicach ($0 \oplus \frac{2}{3} M'_M$).



Rys. 5. Schemat elektrycznego układu napędowego

Gdzie M'_M oznacza moment sprowadzony na stronę maszyny np. M1. Rysunek 5 przedstawia układ połączeń dla przepływu mocy od maszyn M1, M2, M3 (pracujących jako generatory) do maszyny M pracującej jako hamulec dynamiczny. Stosunek momentów napędowych maszyn M1, M2, M3 pozostaje w tych samych granicach jak moment hamujący w poprzednim przypadku.

Aby ułatwić pomiary momentów mechanicznych na poszczególnych wałach maszyn, zostaną sporządzone nomogramy. Do wykonania ich konieczne są pomiary poszczególnych egzemplarzy maszyn.

Układ elektroniczny do mierzenia drogi środka czopa zębniaka centralnego

Dla opracowania elektronicznego układu pomiarowego wykorzystano pracę prof. dr inż. K. Zygmunta pt. "Metody pomiaru przemieszczeń czopa w łożyskach ślizgowych".

Metoda pomiaru jest metodą elektryczną - indukcyjną. W metodzie tej wykorzystuje się zmiany elektrycznej indukcyjności odpowiedniego przetwornika wywołane przemieszczeniem czopa w panewce.

Elementem czynnym przetwornika indukcyjnego jest cewka o indukcyjności L, która to indukcyjność ulega zmianom pod wpływem zmian wielkości mechanicznych.

Zębniak zakończony jest ozopem pomiarowym, który wypełniać będzie głowicę pomiarową, która z kolei stanowić będzie pierścień osadczy dla przetworników indukcyjnych bezstykowych - przetworniki te należy skonstruować, wykonać oraz przebadać.

Oprawki przetworników należy dokładnie ustalić oraz zapewnić zabezpieczenie położenia przed samoluzowaniem pod wpływem drgań mechanicznych lub odkształceń cieplnych.

Wybór metody pomiaru i projekt układu pomiarowego

Aparatura pomiarowa powinna zapewnić pomiar przemieszczeń środka czopa w dwóch osiach do siebie prostopadłych (x,y) z równoczesnym pomiarem położenia kąтового czopa.

Zagadnienie pomiaru przemieszczenia czopa w dwóch osiach x i y będzie realizowane poprzez dwie pary czujników indukcyjnych umieszczonych w głowicy pomiarowej.

Pomiar położenia kąтового czopa zapewni dodatkowy czujnik indukcyjny umieszczony w pobliżu czopa, w którym zostaną nawiercone otwory, reagujący na zmianę szczeliny powietrznej wywołaną przechodzeniem otworu poprzez obszar działania czujnika. Przejście otworu poprzez obszar działania czujnika wywoła impuls elektryczny, który będzie wykorzystany jako znacznik położenia kąтового czopa.

Opis układu elektrycznego

Czujniki indukcyjne połączone w układzie różnicowym umieszczone są w jednej z gałęzi mostka prądu zmiennego. Zmiana położenia czopa względem czujnika powoduje rozstrojenie mostka. Wielkość rozstrojenia jest mierzona poprzez wzmacniacz, demodulator i wskaźnik napięcia.

Mostki prądu zmiennego są zasilane z generatora napięcia sinusoidalnego o częstotliwości 10 kHz.

Ze względu na szkodliwe sprzężenie pasożytnicze między czujnikami osi x i y zastosowano zasilanie obu mostków napięciami przesuniętymi względem siebie o 90° . Przesunięcie fazowe realizuje przesuwnik fazowy włączony przed mostkiem 2 (rys. 6).

Wykonanie modelu czujnika indukcyjnego

Ze względu na brak na rynku krajowym czujników indukcyjnych nadających się do tego pomiaru, zdecydowano się wykonać eksperymentalny model czujnika.

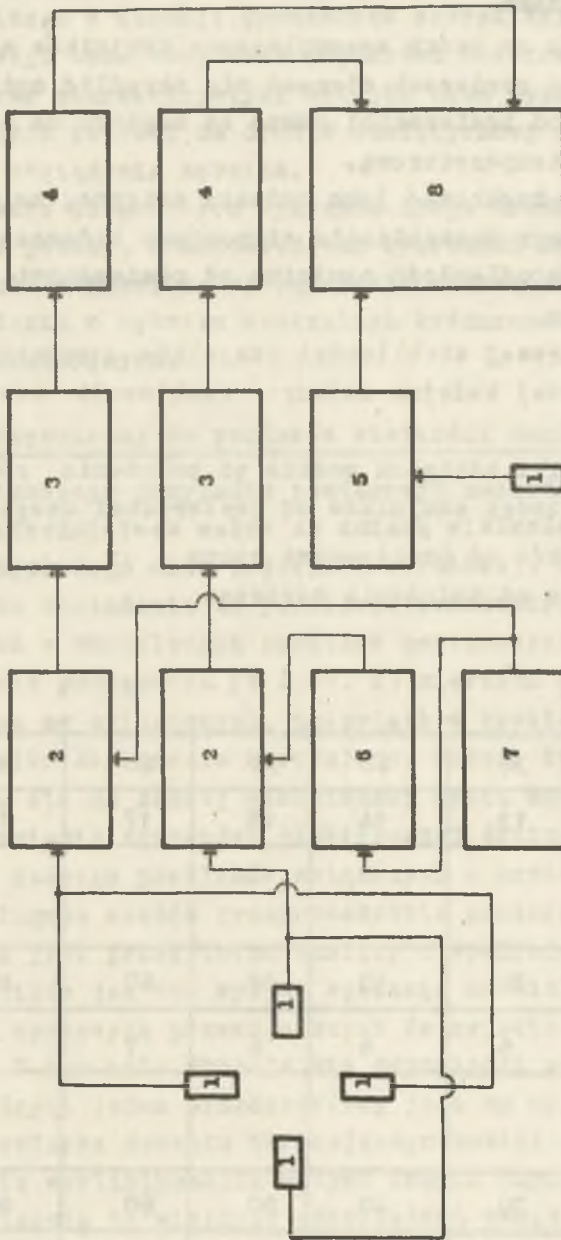
W opracowywaniu danych konstrukcyjnych oparto się na doświadczeniach opisywanych w literaturze.

Dane techniczne:

1. Rdzeń o wymiarach $\phi = 6$ L = 16 z ferrytu F-2001
2. Uzwojenie - 60 zwojów drutu miedzianego $\phi = 0,20$
3. Obudowa stalowa

Wymiary czujnika

$\phi = 14$ mm l = 20 mm



Rys. 6. Schemat blokowy układu pomiarowego

1 - ozujnik indukcyjny, 2 - mostek prądu zmiennego, 3 - wzmacniacz napięciowy, 4 - demodulator, 5 - generator znozników, 6 - generator 10 kHz, 7 - przesuwnik fazowy, 8 - osylograf

Wstępne badania czujnika

Badania prowadzono na dwóch egzemplarzach czujników w układzie różnicowym. Przy pomiarach starano się określić optymalną odległość czujników od powierzchni czopa ze względu na osułość układu i stabilność temperaturową.

Badania te należy traktować jako badania wstępne, ze względu na brak precyzyjnego mechanicznie stanowiska badawczego.

Określona wstępnie odległość czujnika od powierzchni czopa wynosi ok. 1,5-1,7 mm.

Badania temperaturowej stabilności czujników prowadzono w komorze klimatyzacyjnej badając zmiany reaktancji czujników wraz z temperaturą.

W tabeli zebrano wyniki odchyień mostka od położenia równowagi dla różnych odległości czujników od powierzchni czopa.

d - odległość czujników od powierzchni czopa

W - odchylenie mostka od położenia zerowego

t - temperatura

d = 1,0 mm

t	20	30	40	50	60	80
W	11	13	14	15	17	19
d = 1,5 mm						
t	20	30	40	50	60	80
W	5	6	6	6	7	7
d = 1,8 mm						
t	20	30	40	50	60	80
W	5	5	5	6	6	6

Na podstawie tych wstępnych badań określono założenia wstępne do głowicy pomiarowej.

Głównym celem pomiarów są pomiary drogi środka ozopa zębniaka centralnego w funkcji parametrów charakterystycznych silnika napędowego tzn. mocy oraz prędkości obrotowej.

Znajomość charakterystyki silnika oraz wyników pomiarów tensometrycznych pozwoli na drodze analitycznej znaleźć wykresy biegunowe obciążenia zębniaka.

Porównanie biegunowych wykresów drogi środka ozopa uzyskanych przez pomiar, z odpowiednimi wykresami obociążenia dla silnika pozwoli z kolei na wyciągnięcie wniosków na temat przebiegów obciążenia w zębniku centralnym każdorazowo w funkcji jego cech konstrukcyjnych.

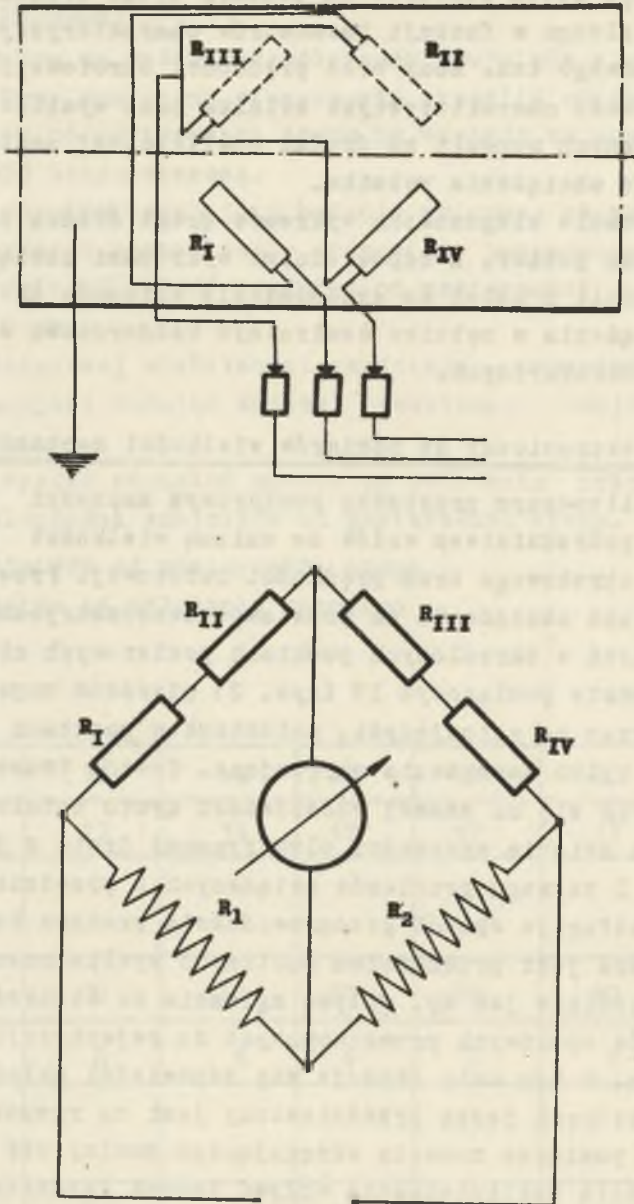
Układ elektroniczny do pomiarów wielkości mechanicznych

W analizowanym przypadku pomiarowym zachodzi przenoszenie mocy za pośrednictwem wałów ze zmianą wielkości przenoszonego momentu obrotowego oraz prędkości obrotowej. Prowadzi to do oceny stanu obciążenia na podstawie tensometrycznego pomiaru odkształceń w określonych punktach pomiarowych układu.

W punkcie pomiarowym IV (rys. 2) mierzono naprężenia skręcające wraz ze zginającymi, natomiast w punktach pomiarowych I i II, III tylko naprężenia skręcające. Zasada tensometrii oporowej opiera się na znanej właściwości drutu metalowego polegającej na zmianie oporności elektrycznej drutu z jego odkształceniem. Z szeregu problemów związanych z przedmiotem badań na uwagę zasługuje sposób przeprowadzenia pomiaru badanej wielkości, która jest przedmiotem analizy o wyeliminowanie wpływu innych czynników jak np. wpływu zginania na wielkość odkształceń czujników oporowych przeznaczonych do rejestracji momentu skręcającego. W tym celu stosuje się odpowiedni układ par czujników, z których jeden przedstawiony jest na rysunku 7.

Przy pomiarze momentu skręcającego musimy się liczyć z koniecznością wyeliminowania wpływu innych czynników jak np. wpływu zginania na wielkość odkształceń czujników oporowych, a równocześnie z wpływem elementu pośredniczącego w przekazywaniu wskazań z wirującego czujnika oporowego na nieruchomy przyrząd wzmacniająca i oscylograf.

Do tego celu zastosowano komutatory srebrne.



Rys. 7. Układ rozetki tensometrycznej

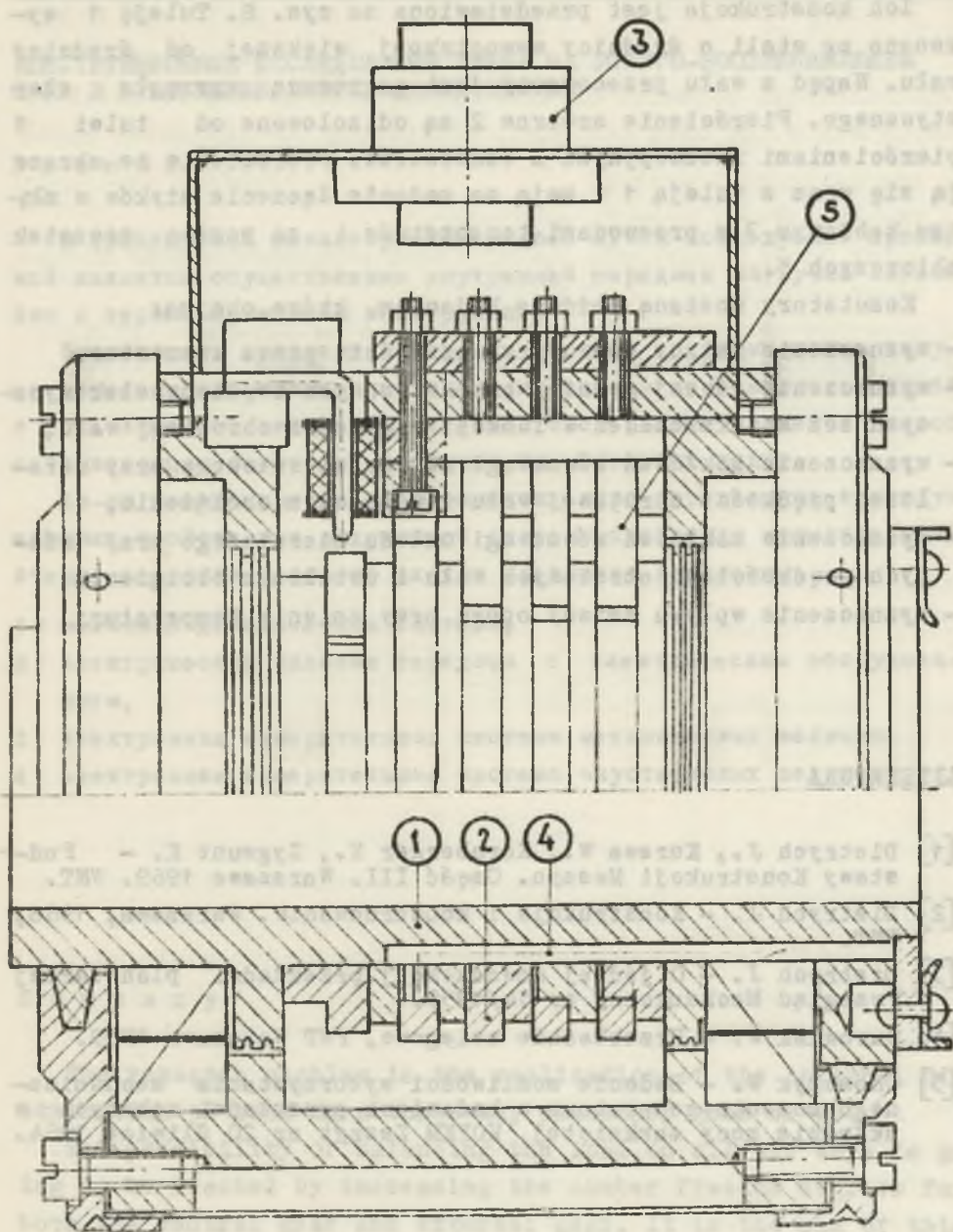


Рис. 8. Коммутатор щеточный

Ich konstrukcja jest przedstawiona na rys. 8. Tuleję 1 wykonano ze stali o średnicy wewnętrznej większej od średnicy wału. Napęd z wału przenoszony jest za pomocą sprzęgła elastycznego. Pierścienie srebrne 2 są odizolowane od tulei 1 pierścieniami izolacyjnymi z tekstolitu. Pierścienie te obracają się wraz z tuleją 1 i mają za zadanie łączenie styków w złączeniu kablowym 3 z przewodami tensometrów 4 za pomocą szozotek zbiorczych 5.

Komutatory zostaną poddane badaniom, które obejmą:

- wyznaczenie zmiany oporu przy przejściu przez komutator,
- wyznaczenie górnej granicy przekazywanych impulsów elektrycznych bez zniekształceń w funkcji prędkości obrotowej wału,
- wyznaczenie zakłóceń równowagi układu mierniczego przy ustalonej prędkości obrotowej wału i ustalonym obciążeniu,
- wyznaczenie zakłóceń równowagi układu mierniczego przy różnych prędkościach obrotowych wału i ustalonym obciążeniu,
- wyznaczenie wpływu zmiany oporu przy zmianie temperatury.

LITERATURA

- [1] Dietrych J., Korewa W., Kornberger Z., Zygmunt K. - Podstawy Konstrukcji Maszyn. Część III. Warszawa 1969. WNT.
- [2] Dietrych J. - Konstrukcja i konstruowanie. Warszawa, 1968, WNT.
- [3] Dietrych J. - O jednej nowoczesnej przekładni planetarnej Przegląd Mechaniczny nr 14/1959.
- [4] Surowiak W. - Przekładnie obiegowe, PWT Warszawa 1959.
- [5] Chomczyk W. - Badanie możliwości wykorzystania mechanicznego momento-generatora w badaniach przekładni zębatych w układzie mocy zamkniętej. KOPKM Zeszyt nr 20 Gliwice 1964.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБА НА УПРУГО-ВОСПРИНИМАЮЩЕМ ВАЛЕ В ПРИМЕНЕНИИ МНОГОХОДОВЫХ СИСТЕМ

Резюме

В трёхходовой планетарной передаче NP-72 исследуемой проблемой является осуществление внутренней передачи нагрузки согласно с первым принципом конструкции.

Возможность сравнения нагрузки на всех ходах мы хотим получить увеличение количества степени свободы центрального триба, а тоже внешнего венца. Характерным этой работы является способ оптимализация состояния нагрузки на отдельных ходах.

Из-за необходимости экспериментального определения конструкционных свойств так задуманной системы построили испытательный стенд, в состав которого входят следующие комплексы:

- 1) механико-динамическая система,
- 2) электрическая силовая передача с электрическим оборудованием,
- 3) электронная измерительная система механических величин,
- 4) электронная измерительная система акустических величин.

Summary

The research problem is the realization of the internal distribution of load in a three-way planetary gear NP-72.

The possibility of balancing the load on all the ways is going to be reached by increasing the number freedom degrees for both the central gear and external gear. It is the aim of this paper to find an original way of optimalising the load conditions on the respective ways.

Considering the necessity of determining experimentally the constructional features of this arrangement an experimental research stand has been designed, consisting the following parts:

- 1) the mechanical system,
- 2) the electrical propulsive system,
- 3) a set of an electronic system for the measurement of mechanical magnitudes,
- 4) a set of an electronic system for the measurement of acoustic magnitudes.