

SYMULATOR ED3 DO ERGONOMICZNEJ OPTIMALIZACJI UKŁADÓW STERUJĄCYCH TELEOPERATORÓW

W celu przeprowadzania ergonomicznej optymalizacji parametrów układów sterowniczych maszyn zbudowano symulator działający na zasadzie pomiaru jakości regulacji z zastosowaniem kryterium całkowitego opartego na kształcie charakterystyki czasowej odpowiedzi operatora na wymuszenie. Repertuar zmiennych symulatora obejmuje 16 parametrów układu sterującego, które mogą być kojarzone w dowolne zestawy. W drodze eksperymentalnej znajduwane są te kombinacje wartości poszczególnych parametrów, dla których jakość regulacji jest najlepsza. Przedstawiono wyniki badań nad optymalizacją parametrów układu sterującego z dźwignią ręczną.

SIMULATOR ED3 FOR A ERGONOMIC OPTIMISATION OF THE TELEOPERATORS CONTROL SYSTEMS

For the ergonomic optimisation of the parameters of the teleoperators control system and elements a Simulator ED3 is build. On the Simulator the follow up tracking is testing. Sixteen parameters of the work space (8), regulation (4) and visual perception (4) is changeable. The quality of regulation for every combination of the value of tested parameters is measured. The best quality of regulation determine these values of parameters, which should be accepted for a technical solution. Research for the optimisation of three parameters of the hand lever was presented.

1. ERGONOMIA WOBEC WYZWANIA „TECHNIKI PRZYJAZNEJ CZŁOWIEKOWI”

1.1. Typy danych oferowanych konstruktorom przez ergonomię

Synteza, jaką jest projekt - wymaga skojarzenia różnych co do pochodzenia i metod pozyskania danych - w jedną, konkretną sytuację współdziałania człowieka z obiektem technicznym. *De facto* projektant zmuszony jest do tworzenia swego rodzaju kompilacji nie zawsze spójnych danych ergonomicznych.

Z typologii danych ergonomicznych do projektowania [6] wynika, że najprostsze dane ergonomiczne przybierają formę skalarową, jako konkretne liczby, którym poszukiwana

wartość P_k ma być równa, bądź od nich mniejsza lub większa, lub też jako zakresy ($J_{max} - J_{min}$), w których wartość P_k ma się zawierać. Dane pokrywające pewien obszar zmienności parametrów układu (tj. pewien zakres stanów) przybierają postać funkcji, ponieważ wartość poszukiwanego parametru P_k zależna jest od co najmniej jednej a najczęściej kilku zmiennych. W sytuacjach realnych jest to zazwyczaj kilka zmiennych, nominalnie (tzn. gdyby traktować je w oderwaniu) niezależnych, lecz faktycznie silnie powiązanych nieznanymi, synergetycznymi¹ oddziaływaniami wzajemnymi. Funkcja tych zmiennych opisuje zbiór: n-wymiarowa przestrzeń danych, w której granicach projektant może się poruszać.

Wynika z tego, że dane typu skalarowego stanowią wyizolowany z kontekstu (tj. wpływu pozostałych zmiennych, działających przeciw bez względu na to, czy będą wzięte pod uwagę) punkt na krzywej, płaszczyźnie, czy ogólnie: w przestrzeni n-wymiarowej. Projektant wykorzystując je w projekcie znajduje się w stresującej sytuacji, w której stan „n” parametrów, dla którego przyjęta przez niego wartość P_k została określona, jest nieznan lub nie do końca znany (np. w normatywach obciążenia siłowego nie podaje się czasu trwania obciążenia są one adekwatne, dla jakiej dokładności manipulacji zostały określone itd.). Gdy istnieje duże prawdopodobieństwo, że synergia między tymi parametrami jest słaba - ryzyko popełnienia błędu jest mniejsze, gdy jednak ich wzajemny wpływ stanowi sedno projektowanego rozwiązania (jak np. w projektowaniu organów sterujących maszyną) - dane typu skalarowego nie są wystarczające. Konieczne jest wówczas sięganie po dane w formie funkcji kilku zmiennych, tych mianowicie, które projektant może względnie swobodnie kształtować.

1.2. Wyczuwanie maszyny przez operatora

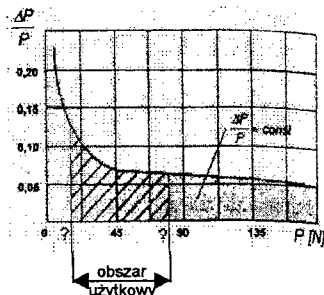
Przy współczesnym, wyrównanym pod względem parametrów technicznych poziomie konkurujących ze sobą maszyn - jednym z poważniejszych, poza ceną, kryteriów decydujących o zakupie - jest szeroko rozumiana „przyjazność” maszyny dla operatora, wyrażająca się nie tylko poprawnym pod względem ergonomicznym rozwiązaniem stanowiska obsługi, ale także dobrym wyczuwaniem położenia i ruchu maszyny i jej elementów w przestrzeni pracy.

Pojęcie „wyczuwalności” maszyny przez operatora [8] wydaje się w potocznym rozumieniu oczywiste, natomiast jest trudne do zdefiniowania w kategoriach obiektywnych, ponieważ wrażenie lepszej czy gorszej wyczuwalności powstaje w *świadomości* człowieka wskutek skumulowanego oddziaływania różnych bodźców, dochodzących do mózgu kanałami zmysłowymi. Czynnici sterownicze są wyrazem zaangażowania psychomotorycznego człowieka i w tych kategoriach wyczuwalność maszyny, lub ogólniej: obiektu technicznego, można określić, jako *pozawzrokową percepcję kształtu i położenia obiektu technicznego lub/i jego elementów oraz sił związanych z funkcjonowaniem tego obiektu*.

Ważnym przyczynkiem do prawidłowego projektowania układów sterujących jest znajomość prawa Webera w odniesieniu do sił wywieranych na elementy sterownicze (rys.1). Prawo Webera głosi, że stosunek wyczuwalnego przyrostu natężenia bodźca docierającego do receptorów człowieka (ΔP) do wartości bezwzględnej tego bodźca P jest wielkością stałą. Stosunek ten nazwano *ułamek Webera*. Zjawisko to odnosi się także do bodźców siłowych występujących przy obsłudze elementów sterowniczych. Wykazano doświadczalnie, że ułamek Webera dla sił wynosi około 0,06. Oznacza to, że człowiek wyczuwa przyrosty siły

¹synergia - współdziałanie, kooperacja czynników, skuteczniejsza (a w każdym razie inna - J.S.) niż suma ich oddzielnych działań (W. Kopaliński: Słownik wyrazów obcych i zwrotów obcojęzycznych. Wiedza Powszechna, Warszawa, 1968)

nie mniejsze niż 6% jej bezwzględnej wartości. Jednak poniżej pewnej wartości (około 45 N) - zależność między wyczuwalnym przyrostem siły a jej bezwzględną wartością przestaje być liniowa. Oznacza to, że wprawdzie wyczuwane są coraz mniejsze przyrosty sił, to jednak dokładność wyczuwania, właśnie owa „wyczuwalność” - ulega raptownemu pogorszeniu. O ile przy sile 100 N wyczuwa się, zgodnie z prawem Webera, zmianę siły wynoszącą 6 N, to przy sile 10 N wyczuwa się wprawdzie zmianę rzędu tylko 1,6 N, ale stanowi to aż ok. 16% wartości bezwzględnej tej siły.



Rys.1. Prawo Webera w odniesieniu do sił

Siły rozwijane na elementach sterowniczych ograniczone są – od strony swych maksymalnych wartości - przez wydolność i zmęczenie mięśni. Z drugiej strony – technika serwo mechanizmów, powszechnie obecnie wykorzystywana - pozwala sprowadzać je do wartości bliskich zera. Wówczas, siłą rzeczy - wchodzą one w obszar pogarszającej się wyczuwalności, niebezpiecznie zbliżając się do progu wyczuwalności. Stawia to konstruktorów maszyn przed poważnym dylematem: do jakich granic zmniejszać obciążenie siłowe, aby nie powodowało niepotrzebnego wysiłku, ale jeszcze było wyczuwalne? Innymi słowy jak zaprojektować układ sterowniczy, aby sterowanie odbywało się z najwyższą możliwą precyzją przy najniższym potrzebnym wysiłku?

Pewną i jednoznaczną odpowiedź na to pytanie uzyskać można właściwie tylko na drodze doświadczalnej, ponieważ liczba zmiennych niezależnych przy projektowaniu układów i elementów sterowniczych sięga kilkunastu a każda z nich ma na ogół wpływ na pozostałe. Tak więc, aby zaprojektować układ sterujący dopasowany dobrze (oznacza to w praktyce: lepiej, niż w wyrobach konkurencyjnych) do cech psychomotorycznych człowieka - należy przeprowadzić odpowiednie badania empiryczne a najwłaściwsza do tego jest metoda symulacji ([2], [3], [4]). Aby ilościowo ocenić, jaka kombinacja parametrów powoduje najlepszą regulację - w badaniach tego rodzaju konieczne staje się zastosowanie obiektywnego i miernika jakości ergonomicznej.

2. JAKOŚĆ REGULACJI JAKO OBIEKTYWNY MIERNIK JAKOŚCI ERGONOMICZNEJ

2.1. Kwantyfikacja jakości ergonomicznej

Jakość ergonomiczną określić można jako *stopień spełniania* przez dany układ: człowiek-obiekt techniczny określonych wymagań ergonomicznych [6]. Sformułowanie takie jest wyjściem naprzeciw pryncypiom metodologicznym kwalimetrii, która wymaga, aby przy wszelkiej ocenie jakości ściśle zdefiniowane były trzy podstawowe kategorie stanowiące instrument oceny, mianowicie: *cechy oceniane, kryteria oceny i mierniki*.

W praktyce ergonomicznej stosuje się mierniki *binarne* lub *wielostanowe*. Miernik typu binarnego (0, 1) jest oceną o najwyższym stopniu syntezy, odpowiada bowiem na pytanie o stopień spełnienia wymagań ergonomicznych w formie alternatywy: „tak” lub „nie”. Oznacza to, że jakość ergonomiczna danej cechy elementarnej danego rozwiązania jest zadowolająca, lub nie. Na ocenie dwustanowej opiera się klasyczna „lista dortmundzka”².

² zob: KANIA J.: Metody ergonomiczne, PWE, Warszawa, 1980

W przypadkach, gdy zachodzi potrzeba drobniejszej gradacji jakości ergonomicznej - stosuje się ocenę z użyciem mierników wielostanowych. Najprostszym z takich mierników jest miernik trójstanowy, wyróżniający trzy możliwe poziomy oceny danej cechy: „tak”, „tak z zastrzeżeniem” i „nie”. W miarę powiększania liczby wyróżnianych stanów (t.j. „rozdzielczości” mierników) - miara jakości ergonomicznej przybiera postać kontinuum, które w przypadku pomiaru zrelatywizowanego w stosunku do przyjętego poziomu odniesienia - zawiera się w przedziale $\langle 0,1 \rangle$ co oznacza że syntetyczny wskaźnik jakości ergonomicznej Q wyraża się ułamkiem: $0 < Q \leq 1$. Ten relatywny miernik pozwala liczbowo oceniać dowolne obiekty różnych klas i porównywać ich jakość ergonomiczną. Jest on charakterystyczny dla metod aparaturowej oceny (pomiaru) jakości ergonomicznej całości lub wybranych elementów układu: człowiek-maszyna

2.2. Jakość regulacji jako miernik jakości ergonomicznej

Do pomiaru jakości ergonomicznej układów sterujących maszyn, zwłaszcza klasy tele- i serwooperatorów, w których szczególnie manifestuje się antynomia między czasem wykonania zadania i popełnianymi błędami - mogą być z powodzeniem zastosowane kryteria oceny jakości regulacji stosowane w teorii regulacji [7]. Z szeregu kryteriów oceny jakości regulacji stosowanych w automatyce [1] najbardziej przystającym do potrzeb ergonomii jest kryterium całkowite, oparte na kształcie charakterystyki czasowej odpowiedzi operatora, na wymuszenie skokowe. Kryterium to spełnia dwa wymagania, jakie stawia badacz zajmujący się układem człowiek-obiekt techniczny:

- jest kryterium behawioralnym tzn. opisuje realistycznie zachowanie układu: człowiek-obiekt techniczny, uwzględniając iunctim czasu i błędu regulacji
- jest kryterium, które traktuje w jednakowych kategoriach oba (tj. techniczny i biologiczny) człony układu.

Według kryterium całkowitego, oparteo na kształcie charakterystyki czasowej odpowiedzi operatora na wymuszenie skokowe błąd regulacji wynosi:

$$U = \int_0^{t_{ex}} |x_t - x_{t,stat}| dt \quad (1)$$

gdzie:

U - błąd regulacji

T_{ex} - czas trwania pomiaru

x_t - chwilowa wartość uchybu

$x_{t,stat}$ - uchyb statyczny (w prezentowanych badaniach $x_{t,stat}=0$, co oznacza, że całkowane jest całe pole pod krzywą)

Znając błąd regulacji, można określić jej jakość. Najprościej jest przyjąć, że jakość regulacji jest odwrotnie proporcjonalna do błędu regulacji:

$$Q = \frac{a}{U} \quad (2)$$

gdzie „a” jest współczynnikiem określony doświadczalnie i wynosi:

$$a = \bar{U}_{min} \quad (3)$$

gdzie: \bar{U}_{min} - najmniejsza średnia wartość uchybu zarejestrowana w badaniach danego układu sterowniczego.

Wówczas jakość regulacji przy konfiguracji parametrów „i” wyniesie:

$$Q_i = \frac{U_{min}}{U_i}$$

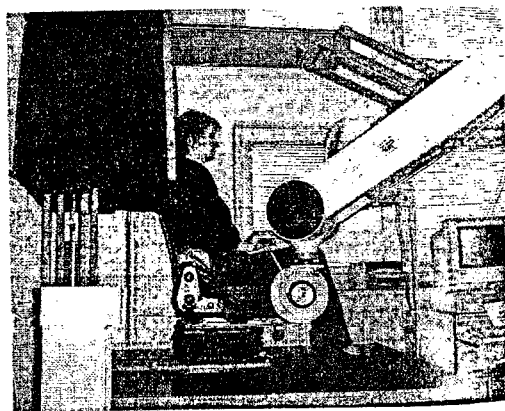
(4)

i zawierać się będzie w granicach: $0 < Q_i \leq 1$, tj. może być wyrażona, jako ułamek (np. procent) najlepszej jakości regulacji ($Q = 1$), jaka wystąpiła w badaniach. Dla korzystającego z wyników badań projektanta oznacza to w praktyce, że w danym rozwiązaniu konstrukcyjnym należy przyjąć takie parametry układu sterującego, jakie pozwoliły tę najlepszą jakość osiągnąć, lub, jeśli to z jakichś względów nie byłoby możliwe - parametry z najbliższego sąsiedztwa tego obszaru.

3. SYMULATOR ED3

3.1. Budowa i działanie symulatora

Powyższy model badań realizowany jest za pomocą zaprojektowanego i uruchomionego w Zakładzie Ergonomii CIOP symulatora ED3 [9], na którym operator wykonuje pracę typu *śledzenia nadążnego*, za pomocą kursora na ekranie, poruszanego elementem sterowniczym badanego układu sterującego Symulator (rys.2) składa się ze sztywnej podstawy, na której usytuowane jest podium z typowym fotelem operatora i robot przemysłowy IRp-60M. Z tyłu przytwierdzona jest do podstawy kolumna do której przymocowany jest poziomy wysięgnik, w którego przedniej części znajduje się zawieszenie monitora, zapewniające możliwość regulacji położenia monitora stosownie do indywidualnych potrzeb operatora. Po wysięgniku przesuwają się harmonijkowa osłona, sprzyjająca izolacji operatora pod względem fizycznym i psychicznym od wpływów zewnętrznych.



Rys. 2. Symulator ED3 - widok z boku

Zadaniem robota, pełniącego rolę sztywnego, inteligentnego statywu [5] jest pozycjonowanie elementu sterowniczego (5 parametrów przestrzennych: trzy współrzędne liniowe: „x”, „y” i „z” i dwie kątowe), za pomocą którego operator steruje położeniem kursora na ekranie, oraz – w pewnych przypadkach – wykonywanie czynności pomocniczych (np. w przypadku sterowania za pomocą dźwigni ręcznej - zmiana długości ramienia dźwigni). Operator (osoba testująca badany układ) realizuje zadanie sterowania nadążnego, polegającego na śledzeniu za pomocą kursora stochastycznie generowanej na ekranie linii, przy użyciu określonego w danej serii badań elementu sterowniczego (dźwigni ręcznej, pedału, kierownicy, pokrętła itp.). Zadanie to realizowane jest z możliwością zmiany kilkunastu parametrów (morfologicznych, regulacyjnych i informacyjnych) badanego układu sterującego. Repertuar zmiennych symulatora ED3 podano w tablicy 1.

Tablica 1. Repertuar zmiennych symulatora ED3

Ip	cechy układu sterującego	parametry symulacji	nastawianie		oznaczenie	jedn. miary	zakres zmienności
			ręczne	automat.			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	morfologiczne	- rodzaj elementu sterowniczego	+		$R_{1...j}$	-	5 rodzajów
2		- forma	+		$F_{1...kf}$	-	3 rodzaje
3		- wielkość	(+)	+	L	[mm]	$80 \div 315$
4		- odległość czołowa		+	x	[mm]	$300+1000$
5		- odległość boczna		+	y	[mm]	$300+750$
6		- wysokość		+	z	[mm]	$300+1300$
7		- kąt nachylenia względem poziomu		+	α	[°]	$0 + 90^\circ$
8		- kąt odchylenia od płaszczyzny strzałkowej		+	β	[°]	$-30 + 90^\circ$
9	regulacyjne	- obciążenia siłowe		+	P	[N]	$0 \div 50$
10		- przełożenie układu		+	i	-	$1 \div 16$
11		- charakterystyka przełożenia		+	$C_{1...4}$	-	4 rodzaje
12		- inercja układu		+	I_n	[s]	$0 \div 0,63$
13	informacyjne	- typ obrazu śledzonego		+	I_{ma}	-	2 rodzaje
14		- prędkość przesuwu obrazu		+	v	[mm/s]	$10 + 80$
15		- sygnał słuchowy (dodatkowo)	+		A_u	-	2 rodzaje
16		- czas ekspozycji		+	t_{ex}	[min]	$0,63 + 120$

Symulator zapewnia możliwość zmiany trzech grup parametrów (cech) badanego układu sterującego (rubryka 2): parametry morfologiczne (przestrzeń i kształt), parametry regulacyjne (wewnętrzne sprzężenia w układzie sterującym) i informacyjne (sposób i forma podawanej operatorowi informacji). Menu generalne symulatora przewiduje możliwość zmiany następujących parametrów (rubryka 3):

Rodzaj elementu sterowniczego. Podstawową decyzją konstruktora jest wybór rodzaju elementu sterowniczego, za pomocą którego przeprowadzana będzie regulacja. Może to być: dźwignia ręczna, pedał, kierownica, kółko ręczne, pokrętło itd.

Forma elementu sterowniczego. Każdy z powyższych elementów sterowniczych może przybierać różnorakie formy, np. kulista, walcowa, owalna, może być gładki, wyprofilowany, kanciasty, obły itd.

Wielkość elementu sterowniczego. Każdy element sterowniczy może być zaprojektowany (lub dobrany z istniejącego typoszeregu), jako mniejszy lub większy, w całym dostępnym zakresie. Testy na symulatorze pozwalają na wybór optymalnego (dla określonej konfiguracji parametrów) rozmiaru elementu.

Odległość czołowa elementu sterowniczego. Odległość czołowa jest to odległość pozioma od operatora, mierzona w płaszczyźnie strzałkowej (prostopadłej do oparcia fotela).

Odległość boczna elementu sterowniczego. Odległość elementu sterowniczego od płaszczyzny strzałkowej operatora.

Wysokość elementu sterowniczego. Wysokość podstawowej osi lub płaszczyzny elementu sterowniczego nad poziomem podłogi lub nad punktem SRP.

Kąt nachylenia względem poziomu. Kąt nachylenia podstawowej osi lub płaszczyzny elementu sterowniczego względem poziomu.

Kąt położenia względem płaszczyzny strzałkowej. Kąt położenia podstawowej osi lub płaszczyzny elementu sterowniczego względem płaszczyzny strzałkowej.

Obciążenie siłowe elementu sterowniczego. Siła przykładana do elementu sterowniczego w kierunku jego ruchu. (Siła ta zmieniana jest za pomocą elektromagnetycznego hamulca ciernego proszkowego, zapewniającego stały moduł momentu obrotowego przy zmianie znaku prędkości kątowej - rys.3).

Przełożenie układu sterującego. Stosunek zakresu ruchu elementu roboczego maszyny (w symulatorze: kursora na ekranie) do zakresu ruchu elementu sterowniczego, określanego przez konstruktora.

Charakterystyka przełożenia układu sterującego. Charakterystyka przełożenia oznacza sposób („gwałtowność”) reakcji elementu roboczego maszyny na ruch elementu sterowniczego. Przełożenie może mieć charakterystykę liniową, wykładniczą, logarytmiczną itd.

Inercja układu sterowania. Opóźnienie w czasie, między sygnałem sterowniczym a reakcją urządzenia roboczego maszyny.

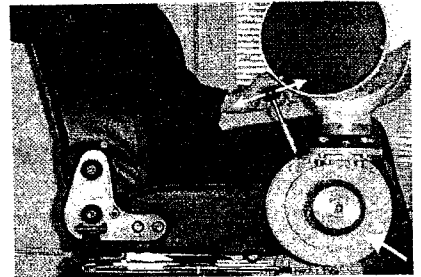
Typ obrazu śledzonego. Na symulatorze w wyposażeniu standardowym generowane są stochastycznie dwa typy obrazu śledzonego: krzywa trapezoidalna i krzywa sinusoidalna, które wystarczają do wymuszania śledzenia nadążnego i oceny jakości regulacji. Mogą być stosowane innego rodzaju obrazy wymuszające śledzenie.

Prędkość przesuwu obrazu śledzonego może być regulowana w granicach zapewniających możliwość przekroczenia wartości progowej w zakresie możliwości reagowania operatora. Większa prędkość, przez wymuszenie większej liczby i wartości błędów regulacji - zwiększa rozdzielczość metody.

Czas ekspozycji oznacza czas trwania jednostkowej operacji śledzenia, przypisanej konkretnej konfiguracji parametrów zmiennych. Jest równoznaczny z czasem pracy operatora.

3.2. Przykład badań: optymalizacja parametrów układ sterującego z użyciem dźwigni ręcznej

Celem eksperymentu było znalezienie optymalnej konfiguracji podstawowych parametrów układu sterującego którego organem wejścia była najczęściej stosowana w sterowaniu nadążnym dźwignia ręczna (wołanty samolotów, zawory hydrauliczne, joy-sticki). Parametrami badanymi były: długość ramienia dźwigni (L), siła przyłożona do ręki (P) i przełożenie układu (i). Wartości parametrów zestawiono w tablicy 2. Liczba ich wzajemnych kombinacji, tworząca macierz wyników eksperymentu, wynosiła: $5 \times 5 \times 3 = 75$. Postawiono hipotezę, że przy pewnej konfiguracji tych parametrów jakość regulacji jest najlepsza, tj. funkcja $Q=f(P,L,i)$ osiąga w badanym obszarze zmiennych co najmniej jedno maksimum.



Rys.3. Elektromagnetyczny hamulec proszkowy do dozowania siły przykładanej na rękojeści dźwigni

Tablica 2. Repertuar zmiennych eksperymentu

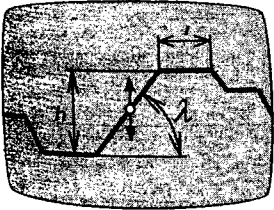
lp.	parametr zmienny	oznaczenie	jedn. miary	wartości				
1	długość ramienia dźwigni	L	[mm]	125	160	200	250	315
2	obciążenie siłowe na rękojeści	P	[N]	~0	5	12,5	20	31,5
3	przełożenie układu	i		1	2	4		

Przy doborze wartości stałych i zmiennych parametrów eksperymentu kierowano się następującymi dyrektywami:

- objęcie (z niewielkim nadmiarem) takiego hipotetycznego zakresu zmienności, aby maksymalna jakość regulacji znalazła się wewnątrz tego zakresu;
- doprowadzenie parametrów eksperymentu do takiego poziomu, przy którym zmiany jakości regulacji są wyraziste;
- utrzymanie błędu pomiarowego w granicach poniżej 0,5%, co implikowało taką rozdzielczość zliczania (całkowania) błędu regulacji, aby miara najmniejszego występującego w eksperymencie błędu \bar{U}_{\min} wyrażała się liczbą nie mniejszą od 200 jednostek odczytu.

Dźwignia ręczna zakończona rękojeścią kulistą (kształt anizotropowy pod względem dotykowym). Największa długość ramienia dźwigni (315 mm) przy zakresie kątowym jej ruchu $\delta = \pm 30^\circ$ odpowiada w przybliżeniu zakresowi ruchu liniowego stawu łokciowego przy poruszaniu dźwigni z quasi-pozycznym przedramieniem. Odległość czołowa, boczna i wysokość rękojeści były dla danego badania stałe, ustalane jako optimum indywidualne dla każdej osoby badanej. Oś obrotu dźwigni leżała w płaszczyźnie poziomej, płaszczyzna obrotu (prostopadła do osi) leżała w płaszczyźnie strzałkowej.

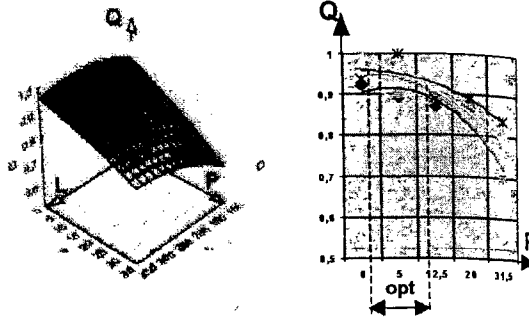
Dwie najwyższe wartości obciążenia siłowego na rękojeści (20 i 31,5 N) nie mają w praktyce zastosowania w realnych układach nadążnych, wybrano je jednak, by stworzyć w eksperymencie ekstremalne wymuszenia. Charakterystyka przełożenia układu była liniowa. Inercja odpowiedzi operatora zerowa. Obraz śledzony był wygenerowaną stochastycznie linią trapezoidalną o podwyższonej gęstości zmian (rys.4). Prędkość przesuwu (poziomego) obrazu śledzonego wносиła 40 mm/s. Śledzenie nadążne odbywało się bez udziału sygnału słuchowego a czas ekspozycji jednostkowej, podczas której następował pomiar jakości regulacji Q dla kolejnej konfiguracji parametrów - wynosił 1,6 min (96 s).



Rys.4. Ekran śledzenia (l, h, λ) - parametry stochastyczne toru

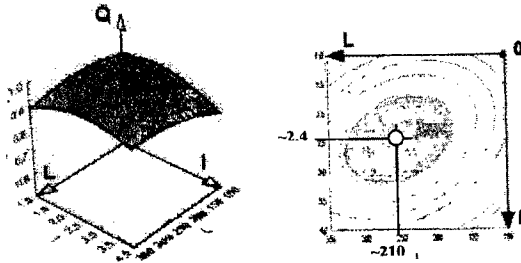
Przebadano grupę 34 mężczyzn, w wieku 22,5 lat ($\sigma = 1,69$) wyrównaną pod względem wieku, stanu zdrowia i zawodu (studenci). W celu zredukowania wpływu monotonii i zmęczenia wprowadzono „rotację” punktu rozpoczynania badania, polegającą na tym, że każda osoba rozpoczynała pracę od innego, stochastycznie wyznaczonego punktu macierzy wyników (ekspozycji jednostkowych). Spowodowało to równe rozłożenie się wpływu monotonii i zmęczenia w jednakowym stopniu na wszystkie komórki macierzy.

Wyniki badań rozpatrywać można w wielu ujęciach. Jako jedno z nich przedstawiono przebieg funkcji $Q=f(P,L,i)$ dla przełożenia $i=2$. (rys.5). Z lewej strony rysunku znajduje się wykres przestrzenny $Q=f(P,L)$, z prawej - rzut powierzchni Q na płaszczyznę (QP). Na wykresie widać, że optymalne obciążenie rękojeści (opt) dla długości ramienia dźwigni: 125, 160 i 315 mm zawiera się w przedziale sił $P=0-12,5$ N.



Rys.5. Zależność jakości regulacji od siły na rękojeści (P) i długości ramienia dźwigni (L) dla przełożenia układu $i=2$.

Przypadek, gdy powierzchnia $Q=f(P,L,i)$ jest powierzchnią wypukłą z wyraźnym maksimum - przedstawiono na rys.6. Z lewej strony rysunku znajduje się wykres przestrzenny $Q=f(L,i)$ dla $P=0$, z prawej - rzut powierzchni Q na płaszczyznę (Li). Na wykresie wyraźnie widać optymalny zakres zmienności obu tych parametrów (szare pole), odpowiadający



Rys.6. Zależność jakości regulacji od długości ramienia dźwigni (L) i przełożenia układu (i) dla siły na rękojeści $P=0$

wierzchołkowi „pagórka” jakości regulacji Q o współrzędnych (2,4; 210). Przypadek taki, z punktu widzenia jednoznaczności wyników najkorzystniejszy - nie zdarza się w prezentowanych badaniach często, gdyż nie zawsze funkcja $Q=f(P,L,i)$ osiąga maksimum wewnątrz zaprogramowanego zakresu zmienności badanych parametrów.

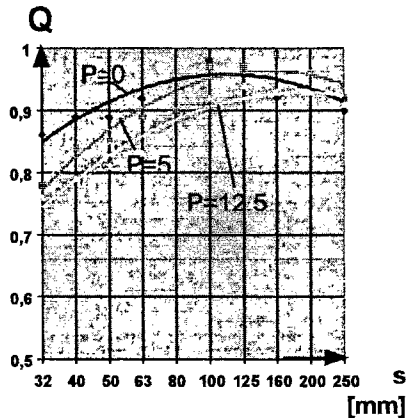
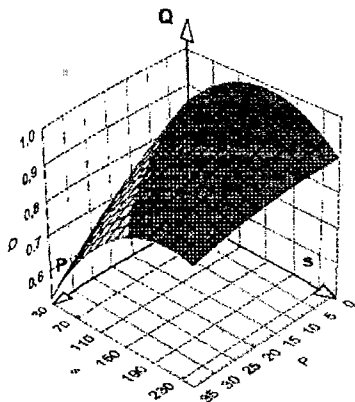
Dla praktycznych potrzeb inżynierskich dokonano w tym przypadku nieco odmiennej, biomechanicznej interpretacji

wyników. Utworzono - przez zintegrowanie przełożenia (i) i długości ramienia dźwigni (L) - nowy parametr określony, zgodnie z potocznym odczuciem, jako *skok rękojeści dźwigni s* [mm]. Parametr ten ma oczywisty dla wykorzystujących niniejsze badania sens kinematyczny i biomechaniczny, reprezentuje bowiem ruch ręki sterującej procesem regulacji. Skok rękojeści dźwigni wiąże długość ramienia (L) z przełożeniem (i) i wynosi:

$$s = 2L \sin \frac{30^\circ}{i} \quad (5)$$

Wyniki badań zinterpretowane w powyższy sposób przedstawiona rys.7. Z lewej strony rysunku znajduje się wykres przestrzenny $Q=f(P,s)$, z prawej - rzut powierzchni Q na płaszczyznę (Q_s) dla trzech wartości sił na rękojeści: ~ 0 ; 4 i 12,5 N.

W tym drugim przypadku należy zauważyć, że krzywe na wykresie mają charakter wypukły a maksima funkcji znajdują się wewnątrz badanego obszaru zmienności. Interesujące dla praktyki projektowania jest określenie współrzędnych punktów maksimum funkcji Q , tj. optymalnych wartości skoków rękojeści elementu sterowniczego w zależności od przyłożonej do niego siły. Wartości te podano w tablicy 3.



Rys.7. Zależność jakości regulacji od skoku (s) i siły na rękojeści (P)

Tablica 3. Optymalny skok elementu sterowniczego w zależności od przyłożonej siły

siła przyłożona do rękojeści [N]:	0	5	12,5
optymalny skok rękojeści [mm]:	108	146	185

LITERATURA

1. ANTONIEWICZ J.: Zarys automatyki. PWN, Warszawa, 1965
2. BEGUIN P., WEILL-FASSINA A. (pod red): La simulation en ergonomie: connaître, agir et interagir. Octares, Toulouse, 1997
3. LEBAHAR J.-Ch.: La simulation, instrument de représentation et de régulation dans la conception de produit. W: Béguin P., Weill-Fassina A. (pod red.): La simulation en ergonomie: connaître, agir et interagir. Octares, Toulouse, 1997 s.77+96
4. MALINE J.: Simuler le travail. Wyd. ANACT, Collection outils et méthodes, Lyon, 1994
5. PILAT Zb., SŁOWIKOWSKI J.: Zastosowanie robota UPR-60 do badań nad optymalizacją ergonomiczną układów sterujących maszyn. Materiały konferencji naukowo-technicznej Automation '99, wyd. PIAP, Warszawa, 1999, s.341 ÷ 348
6. SŁOWIKOWSKI J.: Metodologiczne problemy projektowania ergonomicznego w budowie maszyn. Wyd. Centralnego Instytutu Ochrony Pracy, Warszawa 2000, stron 190
7. SŁOWIKOWSKI J.: Optymalizacja jakości ergonomicznej układów sterujących maszyn roboczych. Materiały V Konferencji: Okrętownictwo i Oceanotechnika, -Maszyny i systemy transportowe, Wyd. Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 2000, s.236÷245
8. SŁOWIKOWSKI J.: Przesłanki ergonomiczne „wyczuwania” maszyny przez człowieka. Bezpieczeństwo Pracy, 2001, nr 7-8, s.2÷6
9. SŁOWIKOWSKI J.: Symulator ED3 do optymalizacji ergonomicznej układów sterujących serwo- i teleoperatorów. Materiały Konferencji: Automatyzacja Produkcji 2000, Wyd. Politechniki Wrocławskiej, seria: Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji, Wrocław, 2000, s.235÷238