

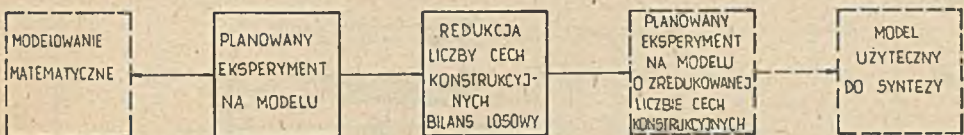
Bożena PALUCHIEWICZ

WYKORZYSTANIE BILANSU LOSOWEGO DO WYZNACZENIA
DOMINUJĄCYCH CECH KONSTRUKCYJNYCH
SILNIKA ASYNCHRONICZNEGO DWUFAZOWEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono wykorzystanie metody bilansu losowego do redukcji liczby cech konstrukcyjnych, których wpływ na wybrane właściwości dynamiki dwufazowego asynchronicznego silnika wykonawczego z wirnikiem puszkowym nie jest dominujący. Metoda eliminacji liczby cech została zilustrowana przykładem. W badaniach wykorzystano eksperyment maszynowy na modelu DAS opisanym w [1].

1. Wstęp

W znanych w literaturze modelach matematycznych dwufazowego asynchronicznego silnika wykonawczego (dalej DAS) współczynnikami są tzw. parametry elektryczne R, L . W celu przeprowadzenia syntezy konstrukcji silnika konieczna jest znajomość związków między cechami konstrukcyjnymi a parametrami elektrycznymi. Można wtedy określić wpływ cech konstrukcyjnych na parametry dynamiki silnika i dokonać wyboru cech dominujących. Jest to kolejny etap po modelowaniu matematycznym [1] w rozwiązywaniu zadania syntezy (rysunek 1) konstrukcji silnika.



Rys. 1. Schemat blokowy etapów syntezy

Dla DAS można na podstawie związków R, L z cechami konstrukcyjnymi wyróżnić 22 cechy, których zmiana wartości wpływa np. na prędkość obrotową czy moment silnika. Zbadanie wpływu wszystkich tych cech, nawet przy zastosowaniu planowanego eksperymentu maszynowego [2, 3], wymagałoby wykonania 2^{22} eksperymentów i zajęło setki godzin czasu maszynowego. Ponieważ jednak właściwy cel pracy polega na wskazaniu ilościowych kierunków zmian cech konstrukcyjnych poprawiających znane konstrukcje, lub adaptacje istniejących konstrukcji w celu uzyskania wymaganych właściwości dynamicznych, można i należy przeprowadzić najpierw wstępną eliminację liczby cech konstrukcyjnych. Eliminację pozostałych cech prowadzono metodą bilansu losowego.

Ideę metody bilansu losowego [2, 3] można sformułować następująco:

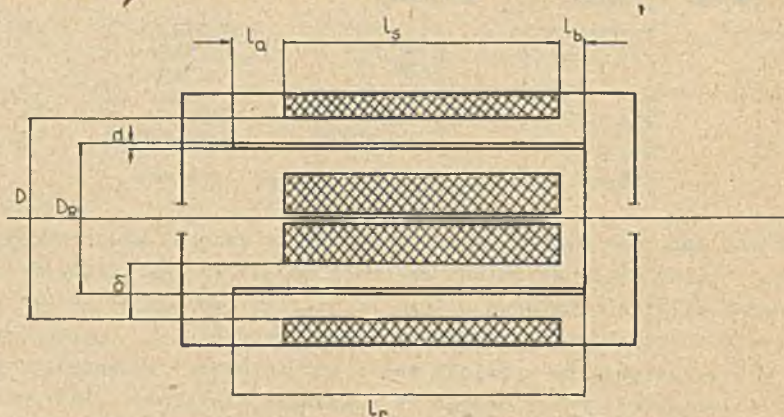
- jako miarę oddziaływania poszczególnych czynników (cech konstrukcyjnych) przyjąć wariancję oceny wartości funkcji (właściwości dynamiki),
- wykonując jak najmniej doświadczeń uporządkować czynniki wg ich malejącego wpływu,
- czynniki mające mały wpływ zaliczyć do pola szumów.

Pierwszym etapem prowadzenia eliminacji czynników metodą bilansu losowego jest sformułowanie macierzy planowania, którą najczęściej otrzymuje się poprzez zmieszanie półpowtórzeń typu 2^{k-p} . Można tu zastosować tablicę liczb przypadkowych, aby zrealizować losowy rozkład poziomów macierzy. Następnymi etapami są: przeprowadzenie eksperymentów, opracowanie ich wyników i ostateczne wydzielenie czynników istotnych, dla których przeprowadzony zostanie właściwy eksperyment i synteza.

Badania związane z wyborem mających dominujący wpływ na właściwości dynamiki cech konstrukcyjnych przeprowadzone zostały dla dwufazowego asynchronicznego silnika wykonawczego typu SAK-2A opisanego w [1].

2. Opis obiektu i macierzy planowania

W zależnościach na parametry elektryczne R, L występują 22 cechy konstrukcyjne silnika. Można je podzielić na 4 grupy. Pierwszą stanowią cechy konstrukcyjne żłobka, drugą - stojana, trzecią - wirnika, czwartą - uzwojeń. Na drodze wstępnej eliminacji liczby cech przyjęto wymiary i liczbę żłobków, przekrój i materiał uzwojeń, stałe materiałowe puszek wirnika, grubość dna i średnicę wału puszki oraz liczbę par biegunów za stałe w konstrukcji silnika. Do siedmiu wyróżnionych na rys. 2 cech kon-



Rys. 2. Schemat DAS

l_r - długość wirnika, D_R - średnica wirnika, d - grubość puszki wirnika, l_s - długość stojana, δ - długość szczeliny, $\frac{l_b}{l_a}$ - stosunek występow puszki

strukcyjnych silnika (dwie wielkości występują dalej w postaci ilorazu), których wpływ na parametry dynamiki zostanie zbadany, dochodzi jeszcze ósma - liczba zwojów uzwojenia stojana z_1 . W tabelicy 1 przedstawione zostały przyjęte poziomy zmian wyróżnionych cech konstrukcyjnych. Poziom oznaczony 0 dotyczy konstrukcji tzw. silnika bazowego, który został poddany badaniu. Poziomy -, + oznaczają odpowiednio zmianę cech konstrukcyjnych o $-\Delta x$ i $+\Delta x$ od wartości bazowej.

Tabela 1

Poziomy zmian	l_r [m]	l_s [m]	$\frac{l_b}{l_a}$ [-]	D [m]	ϕ [m]	z_1 [-]	d [m]	D_R [m]
-	0,034	0,0220	1	0,0337	0,00085	300	0,0004	0,0333
0	0,0345	0,0235	1,2	0,0338	0,0009	330	0,0005	0,0334
+	0,035	0,025	1,4	0,0339	0,00095	360	0,0006	0,0335

Macierz doświadczeń eliminujących (Tabela 2) uzyskano przez zmieszanie dwóch jednakowych półpowtórzeń typu 2^{4-1} z kontrastem określającym $I = x_1 x_2 x_3 x_4$ (x_i - odpowiednie cechy). Jedno półpowtarzanie wykonano dla cech $l_r, l_s, \frac{l_b}{l_a}, D$, drugie półpowtarzanie dla cech ϕ, z_1, d, D_R . Zmieszanie powtarzań dokonano w sposób przypadkowy za pomocą tablicy liczb przypadkowych. Kolumny 2 i 3 tabelicy 2 informują, które wiersze macierzy typu 2^{4-1} dla czterech pierwszych i czterech drugich cech tworzą kolejne wiersze macierzy planowania doświadczeń eliminujących.

Tabela 2

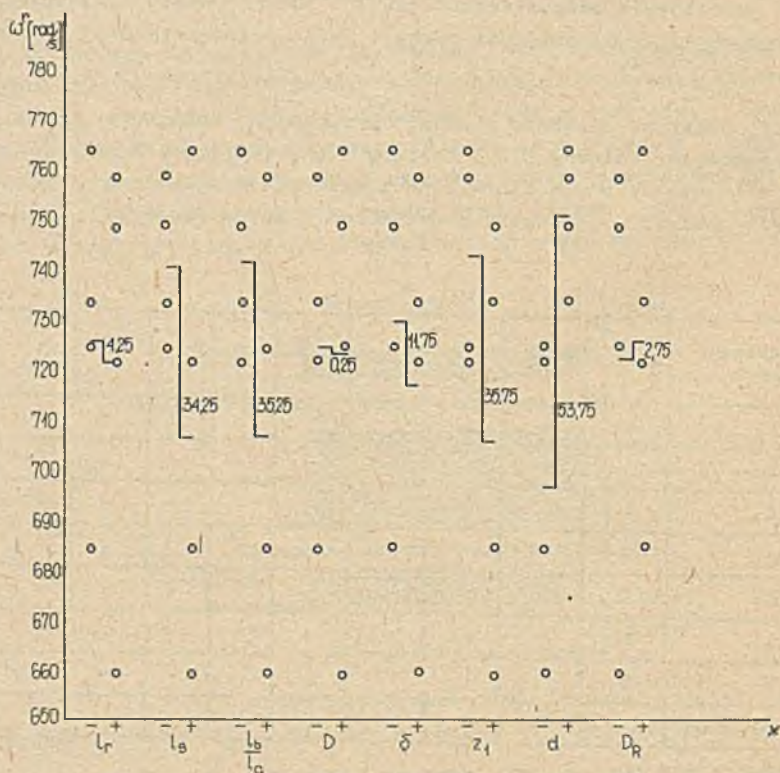
Nr eksperymentu	1-4	5-8	l_r	l_s	$\frac{l_b}{l_a}$	D	ϕ	z_1	d	D_R
1	6	6	+	-	+	-	+	-	+	-
2	3	5	-	+	-	+	-	-	+	+
3	1	8	-	-	-	-	+	+	+	+
4	2	7	+	-	-	+	-	+	+	-
5	7	3	-	+	+	-	-	+	-	+
6	8	4	+	+	+	+	+	+	-	-
7	5	1	-	-	+	+	-	-	-	-
8	4	2	+	+	-	-	+	-	-	+

3. Bilans losowy

Wykorzystując model DAS ze zmienną ψ przedstawiony w [1] (układ równań (2')), powtórzono ośmiokrotnie eksperyment maszynowy dla różnych zestawów wartości cech konstrukcyjnych przy nominalnym obciążeniu silnika. Dziewięć eksperymentów wykonano dla silnika bazowego w stanie jałowym. Wyniki eksperymentów dla stanu ustalonego przedstawia tablica 3. W tablicy podana jest również wartość maksymalna M_{em} (w stanie nieustalonym) oraz wartości stałych czasowych τ i współczynnika rozproszenia σ (gdzie $\tau = \frac{L}{R}$,

$$\sigma = 1 - \frac{(L^{sr})^2}{L^s L^r}.$$

Eksperymenty, których wyniki przedstawia tablica 3, realizowane były wg macierzy planu i w kolejności podanej w tablicy 2. Tak np. wiersz 5 realizuje eksperyment, w którym cechy konstrukcyjne l_r, D, δ, d były na poziomie "-", pozostałe $l_s, \frac{l_b}{l_a}, z_1, D_R$ na poziomie "+". Dla takich wartości cech konstrukcyjnych ustalona prędkość kątowa ω^r silnika wynosi 683 [rad/s], a maksymalny moment $M_{em} = 1,012 \cdot 10^{-2}$ Nm (osiągnięty po czasie $t = 2 \cdot 10^{-3}$ s od chwili załączenia silnika). Na podstawie wyników eksperymentów podanych w tablicy 3 sporządzone zostały wykresy wpływu



Rys. 3. Wpływ zmian cech konstrukcyjnych na prędkość kątową silnika

Tablica 3

Nr eksperymentu	$\psi_d^s \cdot 10^{-2}$ [Wb]	$\psi_q^s \cdot 10^{-3}$ [Wb]	$\psi_d^r \cdot 10^{-3}$ [Wb]	$\psi_q^r \cdot 10^{-3}$ [Wb]	ω^r [rad/s]	$t \cdot 10^{-1}$ [s]	$M_{em} \cdot 10^{-2}$ [Nm]	$\tau^r \cdot 10^{-3}$ [s]	$\tau^s \cdot 10^{-3}$ [s]	δ
1	1,089	8,670	5,044	3,880	758	2,6	1,492	0,679	0,388	0,537
2	1,090	8,655	5,524	4,336	763	2,342	1,672	0,777	0,421	0,469
3	1,094	8,630	5,072	3,819	733	3,853	1,125	0,689	0,466	0,529
4	1,093	8,627	5,588	4,244	748	3,1	1,283	0,787	0,473	0,486
5	0,868	12,337	6,184	4,220	683	3,730	1,012	0,513	0,505	0,473
6	2,298	27,169	13,263	9,617	659	6,323	0,851	0,469	0,498	0,510
7	0,993	9,001	5,663	4,575	724	3,409	1,492	0,518	0,394	0,486
8	1,270	9,175	4,655	3,987	721	3,906	1,18	0,465	0,415	0,518
9	1,125	8,350	5,446	4,047	811	3,029	2,268	0,613	0,44516	0,50035

Wykresy dla iloczynów czynników sporządza się analogicznie jak wykres przedstawiony na rysunku 3. Wykorzystuje się wyniki eksperymentów z tablicy 3, przy czym poziomy "+" i "-" iloczynów cech konstrukcyjnych odczytuje się z macierzy doświadczeń eliminujących (dla ułatwienia zadania można sporządzić dodatkowo macierz iloczynów powiększając tę z tablicy 2 o 16 kolumn).

Na podstawie wykresów można przeprowadzić klasyfikację cech konstrukcyjnych silnika zaliczając je bądź do grupy dominujących, bądź do pola szumów. Klasyfikacja ta dla wybranych parametrów dynamiki przedstawiona jest na rysunku 4. Rysunki 4a,b,c,d,f,g,h pokazują klasyfikację cech pojedynczych, a 4e oraz i iloczynów cech konstrukcyjnych. Wyniki analizy wpływu cech pojedynczych na parametry dynamiki i niektóre pozostałe wymagania specjalne zebrano w tablicy 4. Numer kolumny tablicy określa wagę (kolumna 1 ma największą wagę) wpływu cechy konstrukcyjnej na wybrany parametr. Jeśli bada się wpływ cech konstrukcyjnych na kilka parametrów jednocześnie, to należy obliczyć sumę wag poszczególnych cech.

Tablica 4

	1	2	3	4	5	6	7	8
ω^r	d	$z_1 \frac{l_b}{l_a} l_s$			\emptyset	l_r	D_R	D
t_{ust}	d	z_1	\emptyset	l_s	$\frac{l_b}{l_a}$	l_r	D_R	D
ψ_d^s	$l_r \emptyset$		l_s	$DD_R z_1 d$			$\frac{l_b}{l_a}$	
ψ_q^s	$d l_s \frac{l_b}{l_a}$	z_1			$l_r \emptyset$	$D_R D$		
ψ_d^r	$z_1 \frac{l_b}{l_a}$	D	$d D_R l_s$		l_r	\emptyset		
ψ_q^r	D	d	$D_R \frac{l_b}{l_a}$	l_s	z_1	l_r		\emptyset
$\frac{\omega_o^r}{t_{ust}}$	d	z_1	\emptyset	$\frac{l_b}{l_a}$	l_s	l_r		DD_R
M_e	z_1	d	\emptyset	l_s	$D l_r$	$\frac{l_b}{l_a}$		D_R
η_o	d	$\frac{l_b}{l_a}$	\emptyset	z_1	D	l_s	l_r	D_R

cd. tablicy 4

	1	2	3	4	5	6	7	8
J	d		$\frac{l_b}{l_a}$	l_s	D_R	D	δ	$z_1 l_r$
τ^r	d	$\frac{l_b}{l_a}$	l_s		δ	D	l_r	$D_R z_1$
τ^s	z_1		l_s	d	D_R	δ	$D \frac{l_b}{l_a}$	l_r
δ	δ	l_r	D	l_s	D_R	d	$\frac{l_b}{l_a}$	z_1
S_k	d		$l_s \frac{l_b}{l_a}$		δ	l_r^D	D_R	z_1

Tablica 5

Lp.		Miejsce wg sumy wag wpływu cechy			
		I	II	III	IV
1	Wpływ na wszystkie parametry z tablicy 4	d	z_1	$\frac{l_b}{l_a}$	l_s
2	Wpływ na ω^r , t_{ust}^s , ψ_d^s , ψ_q^s $\frac{\omega^r}{t_{ust}}$, M_e	d	z_1	l_s	δ
3	Wpływ na τ^r , τ^s , δ	z_1	δ , l_s	d	D
4	Wpływ na $\frac{\omega^r}{t_{ust}}$, M_e , ψ_d^s , ψ_q^s	d	z_1	δ	l_s
5	Wpływ na $\frac{\omega_o^r}{t_{ust}}$	d	z_1	δ	$\frac{l_b}{l_a}$

W celu zapewnienia kompletności badań przeprowadzono jeszcze analizę wpływu iloczynów podwójnych cech na właściwości dynamiki. W tablicy 5 uwzględniono cztery miejsca dominujące dla kombinacji parametrów o największej sumie wag dla różnych zestawów właściwości dynamiki. W tablicy występują również wielkości: τ_o wyrażająca stosunek strat $I^2 R$ w wirniku do całkowitych strat w stanie zwarcia, zwana współczynnikiem wykorzystania oraz S_k - poślizg krytyczny symetrycznie zasilanego silnika.

4. Wnioski

W wyniku bilansu losowego przeprowadzonego po eksperymentach na modelu (2') opisanym w [1], a zawierającym 22 cechy konstrukcyjne, wyróżniono cztery cechy dominujące. I tak, w przypadku jeśli wyróżnimy wpływ cech na parametry $\frac{\omega^r}{\tau_{ust}}$, M_g , ψ_d^s , ψ_q^s to dominujące są: grubość puszkii wirnika d , liczba zwojów z_1 , długość szczeliny δ i długość stojana l_s (wiersz 4 w tabelicy 5). Zauważmy, że trzy parametry d , l_s , z_1 występują jako dominujące we wszystkich przypadkach wyróżnionych w tabelicy 5.

Do dalszych badań przyjęto cechy konstrukcyjne d , l_s , z_1 , δ za dominujące i te zmieniane będą na poziomach "+" i "-", tzn. przeanalizujemy pracę DAS dla zmienionych o $\pm \Delta x$ od wartości bazowych tych cech konstrukcyjnych. Wartości pozostałych cech są stałe i równe wartościom bazowym. Otrzymane wyniki zostaną wykorzystane w trzecim etapie badań do przeprowadzenia eksperymentów maszynowych, prowadzących do uzyskania prostego a zatem przydatnego do celów syntezy i optymalizacji modelu DAS. Eliminacja cech konstrukcyjnych, które można zaliczyć do pola szumów, spowodowała zmniejszenie liczby eksperymentów maszynowych do szesnastu (w miejsce 256, które należałoby wykonać przy pełnym eksperymencie dla ośmiu wyróżnionych cech). Mała liczba eksperymentów skraca czas obliczeń, a mała liczba cech konstrukcyjnych wiąże się z większą czytelnością ostatecznego modelu. Ponadto mała liczba cech czyni praktycznie realną optymalizację DAS ze względu na wybrane właściwości dynamiki.

Przypomnijmy, że uwzględnienie czterech zamiast 22 cech konstrukcyjnych oczywiście upraszcza model, ale również zmniejsza jego dokładność, dlatego otrzymane rezultaty będą raczej określały tendencje wpływów zmian cech konstrukcyjnych na właściwości dynamiki.

LITERATURA

- [1] Pałuchiewicz B.: Modele matematyczne dwufazowego asynchronicznego silnika wykonawczego przydatne do analizy numerycznej. Zeszyty Naukowe Automatyka **7**, 61.
- [2] Kacprzyński E.: Planowanie eksperymentów. Podstawy matematyczne. WNT, Warszawa 1974.
- [3] Nalimow W.W., Czernowa N.A.: Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych, WNT, Warszawa 1967.

Złożono w redakcji 17.06.80 r.
W formie ostatecznej 15.03.81 r.

Recenzent
Prof. dr hab. inż. Zygmunt Bajorek

ПРИМЕНЕНИЕ СЛУЧАЙНОГО БАЛАНСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПРЕОБЛАДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПРИЗНАКОВ
ДВУХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Р е з ю м е

Статья содержит применение метода случайного баланса для уменьшения количества конструктивных признаков, которых влияние на свойства динамики двухфазного асинхронного двигателя не являются преобладающими. Исследованный метод иллюстрируется примерами. В исследованиях был использован машинный эксперимент на модели DАS описанной в [1].

APPLICATION OF THE RANDOM BALANCE METHOD IN DETERMINATION
OF DOMINANT DESIGN FEATURES
OF TWO-PHASE SERVO MOTORS

S u m m a r y

The paper presents an application of the random balance method in order to reduce a number of design features having no dominant influence on the dynamics of two-phase servo motors. The method of feature elimination has been illustrated by an example. A machine experiment using the DАS model [1] has been used in researches.