

Wiesław Zapałowicz
Jan Reichel

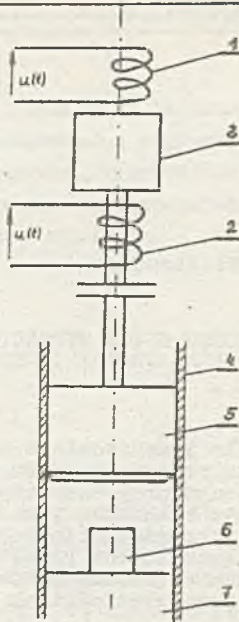
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica

STEROWANIE ENERGOOPTYMALNE PROCESEM KUCIA WIBRACYJNEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę możliwości sterowania optymalnego dyskretnym procesem kucia wibracyjnego na młocie elektromagnetycznym, przy energetycznym kryterium optymalności. Minimalizacja wskaźnika jakości, przy ograniczeniach technologicznych i wytrzymałościowych urządzenia, pozwala na wyznaczenie optymalnych czasów przełączeń sterujących zmianami napięcia w cewkach elektromagnesów młota. Możliwości sterowania przedstawiono przy częstotliwościach uderzeń od 5+20 Hz.

1. Wstęp

Proces kucia polega na przekazywaniu obrabianemu metalowi w kolejnych cyklach energii kinetycznej narzędzia wykonującego ruch posuwisto-zwrotny. Energia ta przekształcona zostaje w pracę odkształcenia plastycznego. Klasyczne młoty powodują w jednym cyklu duże odkształcenia odkuwki, co nie zawsze jest korzystne. W zależności od konstrukcji mogą one wykonywać od 30+500 cykli na minutę, tzn. pracować z częstotliwością od 0,5+8 Hz. Procesem nowym, nie znanym jeszcze praktyce przemysłowej, jest proces kucia wibracyjnego. Częstotliwość pracy (8+100 Hz) i amplituda odkształcenia odkuwki w tym procesie (przemieszczenie górnej powierzchni odkuwki pod wpływem uderzenia narzędzia w jednym cyklu pracy) zapewniają efekty charakterystyczne dla procesów wibracyjnych, tj. niski opór odkształcenia i równomierność struktury. Istotnym elementem młota elektromagnetycznego jest zespół dwóch cewek i rdzeń ferromagnetyczny, poruszający się w wytwarzanym przez nie polu elektromagnetycznym (rys. 1). Powstająca siła oddziaływania pola daje możliwość ruchu rdzenia, zaś stała czasowa obwodu elektrycznego umożliwia drgania bijaka młota z pewną częstotliwością. W Instytucie Maszyn Hutniczych i Automatyki AGH prowadzone są badania w zakresie konstrukcji, sterowania młotem wibracyjnym, jak również technologii związaną z tym charakterem kucia.



Rys. 1 Schemat konstrukcyjny młota
 1-cewka górna, 2-cewka dolna, 3-rdzeń ferromagnetyczny, 4-przewodnica, 5-bijak, 6-odkuwka, 7-kowadźło

2. Analiza dynamiki młota elektromagnetycznego.

Dynamikę systemu, jaki stanowią: cewki, rdzeń i części spadające młota opisuje układ równań [4]:

$$F(t) = 0,5 i^2(t) \frac{dL(x)}{dx}, \quad /1/$$

$$Ri(t) + \frac{dL(x(t)) i(t)}{dt} = u(t), \quad /2/$$

$$m\ddot{x}(t) + B\dot{x}(t) = \pm F(t) - mg, \quad /3/$$

gdzie: $F(t)$ - siła pola elektromagnetycznego, $i(t)$ - prąd w cewkach, $L(x)$ - indukcyjność cewki będąca funkcją x położenia rdzenia, R - rezystancja cewki, $u(t)$ - napięcie sterujące, m - masa rdzenia i części spadających, B - współczynnik tarcia wiskotycznego w przewodnicach młota.

W momencie zetknięcia się bijaka z odkuwką na wysokości h_0 pojawia się opór odkształcenia plastycznego. Siła tego oporu zależy od szybkości odkształcenia, równomierności rozkładu naprężeń i tarcia metalu o powierzchnię narzędzia [1], [3], [6]:

$$P = \pi \sigma_p z S T = p S l, \quad /4/$$

gdzie: w - współczynnik uwzględniający wpływ prędkości odkształcenia równy

$$w = 1 + 0,02 \frac{v}{h} \quad /5/$$

v - prędkość narzędzia w chwili uderzenia, h - wysokość odkuwki przed odkształceniem, σ_p - granica plastyczności metalu w temperaturze odkształcenia stała dla wszystkich cykli, z - współczynnik zależny od kształtu narzędzia (dla kowadeł płaskich $z=1$), S - powierzchnia metalu po skuciu, φ - współczynnik wzrostu oporu odkształcenia na skutek tarcia metalu o powierzchnię narzędzia, przy czym

$$\varphi = 1 + \frac{2}{3} \mu n \quad /6/$$

μ - współczynnik tarcia między powierzchniami narzędzia i metalu, n - współczynnik hamowania (stosunek powierzchni naciskanej do powierzchni wolnej).

Zmianę energii kinetycznej narzędzia w energię odkształcenia plastycznego (z pominięciem rozproszenia ciepłego) opisuje równość:

$$L_p = \frac{mv^2}{2} = PV \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} \quad /7/$$

gdzie: V - objętość odkuwki, P - siła oporu odkształcenia, h_0 - wysokość odkuwki przed odkształceniem, h_1 - wysokość odkuwki po odkształceniu.

3. Dyskretny model procesu.

Cykliczny charakter procesu pozwala na dyskretny opis poszczególnych faz odkształcenia od pewnego stanu początkowego dożądanego końcowego. Zakładając nieściśliwość metalu (stałość objętości odkuwki w każdym cyklu) oraz cylindryczny jego kształt o średnicy d , jak również jego stateczność (zachowanie cylindrycznego kształtu w każdym cyklu) można wyznaczyć wysokość odkuwki po i -tym odkształceniu wg zależności [4]:

$$h_i = h_{i-1} \exp \left(- \frac{mv_{i-1}^2}{2(1+0,02 \frac{v_{i-1}}{h_{i-1}})(1+\frac{2}{3} \frac{\mu}{h_i} \sqrt{\frac{V}{\pi h_i}}) \sigma_p V} \right) \quad /8/$$

zaś siłę oporu odkształcenia w przedziale $[h_{i-1}, h_i]$

$$P_i = (1+0,02 \frac{v_{i-1}}{h_{i-1}})(1+\frac{2}{3} \frac{\mu}{h_i} \sqrt{\frac{V}{\pi h_i}}) \sigma_p \frac{V}{h_i} \quad /9/$$

przy czym powierzchnię odkuwki stykającą się z narzędziem opisuje zależność

ność:

$$S_1 = \frac{V}{h_1} \quad /10/$$

Równania ruchu w przedziale $[h_{1-1}, h_1]$ mają postać:

$$Ri(t) + \frac{dL(x(t))}{dt} = u(t)$$

$$F(t) = 0,5 i(t)^2 \frac{dL(x)}{dx}$$

$$m\ddot{x}(t) + B\dot{x}(t) = \pm F(t) - mg + P_i(x) /11/$$

$$x \in [h_{1-1}, h_1] |$$

przy czym znak $F(t)$ warunkowany jest kierunkiem ruchu rdzenia.

4. Sterowanie energooptymalne

Matematyczny opis systemu rzeczywistego jest modelem niestacjonarnym i nieliniowym. Komplikuje to możliwość wyznaczenia sterowania optymalnego przy nieliniowym energetycznym wskaźniku jakości

$$J = c \sum_{k=1}^2 i_k^2(t)$$

i ograniczeniach w postaci stanu systemu. Z uwagi na powolne w czasie zmiany wartości parametrów ruchu rdzenia można dokonać aproksymacji liniowej sprowadzającej układ do równań stacjonarnych i liniowych. Wektor stanu systemu przyjmie wtedy postać:

$$\underline{z}(t) = \phi(t) \left[\underline{z}_0 + \int_0^t \phi^{-1}(\tau) \underline{B}u(\tau) d\tau \right], \quad /12/$$

gdzie: z_1, i_1 - prąd w cewce górnej, z_2 - położenie części spadających, z_3 - prędkość zmian położenia, z_4, i_2 - prąd w cewce dolnej, $\phi(t)$ - $n \times n$ macierz podstawowa. Po dyskretyzacji przedziału $[t_0, t_f]$ czasu pracy młota na odcinku T_i :

$$T_i = t_i - t_{i-1},$$

przy czym

$$\sum_{i=1}^N T_i = T = t_f - t_0 \quad /13/$$

zagadnienie optymalizacji polegać będzie na wyznaczeniu czasów przełączeń t_i oraz wartości napięcia sterującego $u(t)$ przyjętego a priori jako funkcja odcinkami stała. Dla kolejnych dwóch przedziałów T_i stan systemu będzie opisany

$$\underline{z}(i) = e^{AT_1} \left[\underline{z}(i-1) + \int_{t_{i-1}}^{t_i} e^{A(t_{i-1}-\tau)} B d\underline{u}(i-1) \right] \cdot$$

/14/

Równanie to odpowiada układowi $n \times n$ równań algebraicznych, dających ograniczenia stanu systemu, gdzie: n jest wymiarem \underline{z} , zaś A macierzą stanu. Przedstawiony problem minimalizacji wskaźnika jakości wymaga zastosowania metod programowania nieliniowego. Z uwagi na jego specyfikę, tj. liniowy charakter ograniczeń oraz kwadratową postać wskaźnika zagadnienie rozwiązano metodą Lagrange'a.

5. Analiza rozwiązań.

Obliczenia optymalizacyjne przeprowadzono dla pewnej próbki w zakresie częstotliwości od 5+20 Hz, przy czym w tabelicy 1 przytoczone zostały parametry młota i próbki, zaś w tabelicy 2 ciekawsze wyniki rozwiązań.

Tabela 1

| Parametry młota | |
|-------------------------------------|---|
| Rezystancja cewki | $R = 6,5$ |
| Indukcyjność cewki bez rdzenia | $L = 190 \text{ mH}$ |
| Długość cewki | $l = 114 \text{ mm}$ |
| Średnica wewn. cewki | $d_w = 68 \text{ mm}$ |
| Średnica rdzenia | $d_r = 64 \text{ mm}$ |
| Długość rdzenia | $l_r = 160 \text{ mm}$ |
| Masa rdzenia i bijaka | $m = 8 \text{ kg}$ |
| Współczynnik tarcia wiskotycznego | $B = 9 \text{ Ns/m}$ |
| Parametry próbki | |
| Wysokość początkowa odkuwki | $h_o = 0,01 \text{ m}$ |
| Wysokość końcowa odkuwki | $h_f = 0,00095 \text{ m}$ |
| Granica plastyczności | $\sigma_p = 29,43 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ |
| Średnica odkuwki | $d_o = 0,012 \text{ m}$ |
| Współczynnik tarcia metal-narzędzie | $\mu = 0,3$ |

Tablica 2

| | Częstotliwość układu | |
|-----------------------------------|----------------------|-----------|
| | 10 Hz | 14 Hz |
| Czas działania cewki górnej T_1 | 0,01829 s | 0,01839 s |
| Czas działania cewki dolnej T_2 | 0,06946 s | 0,04078 s |
| Napięcie sterowania cewki górnej | 224,9 V | 224,4 V |
| Napięcie sterowania cewki dolnej | 109,6 V | 220 V |
| Wartość wskaźnika jakości | 283,6 J | 302,9 J |

Dla przedstawionych częstotliwości pracy systemu najmniejszą wartość wskaźnika jakości uzyskuje się przy 10 Hz. Układ taki wymaga jednak sterowania czasowego i napięciowego w trakcie cyklu, co komplikuje jego realizację techniczną. Prościej w realizacji jest system pracujący z częstotliwością 14 Hz, dla którego wymagane jest praktycznie sterowanie czasem przełączeń przy stałej wartości napięcia.

6. Wnioski

Przedstawione w artykule rozważania dotyczyły sformułowania opisu matematycznego i optymalizacji systemu elektromechanicznego, jakim jest wibracyjny młot elektromagnetyczny. Na bazie tego opisu dokonano symulacji pracy urządzenia i jego optymalizacji w zakresie częstotliwości od 5-20 Hz. Uzyskano dobrą zgodność eksperymentu dokonanego w skali laboratoryjnej z symulacją pracy modelu młota. Daje to podstawę opracowania wytycznych konstrukcyjnych dla młota optymalnego pod względem energetycznym w warunkach przemysłowych służącego do kucia wibracyjnego. Cyfrową symulację pracy młota oraz obliczenia optymalizacyjne przeprowadzono za pomocą systemu CYBER 72.

LITERATURA

- [1] Bukowski P.: Technologia przeróbki plastycznej na gorąco. Warszawa 1958.
- [2] Chomiczki J.: Teoretyczne podstawy obróbki plastycznej. Gdańsk 1974.

- [3] Karnov M.Ia., Voronin A.A.: Vibracjonnyje metody deformirovanija. Kuznicno Stampovocnoje Proizvodstvo. 1960 nr 3.
- [4] Sienko J.: Synteza konstrukcji wibracyjnego młota elektrycznego do kucia swobodnego. Praca doktorska pod kierunkiem W. Zapalowicza, Kraków 1975.
- [5] Tabak D., Kuo B.: Optimal control by mathematical programming. New Jersey 1971.
- [6] Wasiluk P., Jarocki J.: Kuźnictwo i prasownictwo, Katowice 1973.

ЭНЕРГООПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ВИБРАЦИОННОЙ КОВКИ

Р е з ю м е

В статье представлено анализ возможности оптимального управления дискретным процессом вибрационнойковки на электромагнитном молоте в смысле энергетического критерия оптимальности. Опираясь на динамику устройства, на его симуляционной модели можно определить оптимальные его параметры в пределе 5 - 20 гц. Решение этой проблемы использовано в качестве рекомендаций при конструкции молота работающего в промышленных условиях.

MINIMUM ENERGY CONTROL OF THE VIBRATORY FORGE PROCESS

S u m m a r y

In the paper an analysis of possibility of the optimum control of the discrete vibratory forge process is presented in case of the hammer with the electromagnetic drive. The minimum energy performance index has been assumed. Simulation and optimization of the hammer's work in the frequency range between 5 and 20 cps has been performed basing on the hammer's dynamic model. The results has consisted the guide line for designing the industrial scale hammer.