

LITERATURA

[1] Velenšek, B., Študij in izračun črpalke inducer. Litostroj — Raziskovalna skupnost Slovenije — Turboinštitut, poročilo št. 1238, Ljubljana, okt. 1977.

[2] Velenšek, B., Superkavitacijski inducer kot predstopnja kondenzatne pumpe. Raziskovalna skupnost Slovenije — Turboinštitut, poročilo št. 1368, Ljubljana, jan. 1980.

[3] Velenšek, B., Sprememba vstopnega vrtnica v pojemalni kaskadi ter njegov vpliv na karakteristiko aksialnega turbinskega stroja. Disertacija. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 1976.

[4] Sosa, F., Baker, E. W., Acoustic Evaluation of Axial — Flow Propellers and their Influence on Pump Vibratory Characteristics. Joint Symposium on Design and Operation of Fluid Machinery, Volume II., June 1978, Fort Collins, Colorado, USA.

[5] Knöpfel, H. D., Matthias, H. B., A Contribution to the development of impellers for the suction stage and inducers with additional radial impeller for condensate pumps. 5th Conference on Fluid Machinery, Budapest, Sept. 1975.

[6] Brennen, C., Acosta, A. J., The Dynamic Transfer Function for a Cavitating Inducer. Journal of Fluids Engineering, June 1976.

[7] Janigro, A., Ferrini, F., Inducer Pumps. Recent Progress in Pump Research, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Bruxelles, Dec. 1973.

[8] Okamura, T., Miyashiro, H., Design and Performance of Supercavitating Pumps. Joint Symposium on Design and Operation of Fluid Machinery, Volume II, June 1978, Fort Collins, Colorado, USA.

[9] Čebaevskij, V. F., Petrov, V. I., Kavitationnye karakteristiki vysokooborotnyh šneko — centrobežnyh nasosov. Moskva »Mašinostroenie« 1973.

[10] Sebestyn, G., Stvrterzky, F., Szabo, A., Correlation between the acoustical and erosion properties of cavitation in a pump. AIHR Symposium, Rome 1972.

[11] Lakshminarayana, B., Three Dimensional Flow Field in Rocket Pump Inducers. Journal of Fluids Engineering, Dec. 1973.

Avtorjev naslov: dr. Boris Velenšek, dipl. ing.
Turboinštitut
61210 Ljubljana

UDK 539.38

Vpliv preteklih obremenitev na mehansko odpornost

ADOLF ŽIŽEK

1. UVOD

V strojništvu so se v petdesetih letih — po več zaporednih nesrečah nekaterih potniških letal — začeli sistematično ukvarjati z zanesljivostjo. Iz tega obdobja izvira tudi izraz »utrujenost snovi«. V istem obdobju so se začeli ukvarjati z zanesljivostjo tudi v elektrotehniki zaradi velikega števila okvar nekaterih elektronskih naprav. Dandanes se uporabljajo pri zanesljivosti skoraj izključno metode, ki so bile razvite v zvezi z elektronskimi sistemi, utrujenost snovi (ali z drugimi besedami: kako vplivajo pretekle dinamične obremenitve na mehansko odpornost in s tem posredno na zanesljivost mehanskega sistema) pa je nekako pozabljena.

V mehanskih sistemih so obremenitve predvsem sile, momenti sil, tlaki, temperatura, moč ter koncentracije motečih in razjedajočih snovi. Vse našteje obremenitve so fizikalne veličine, ki so stalne ali pa se s časom spreminjajo. Obremenitve so stalne predvsem v laboratorijskih razmerah, v dejanskih okoliščinah, v katerih obratujejo mehanski sistemi, pa se s časom spreminjajo, in to največkrat naključno.

Vsaki od obremenitev se mehanski sistem upira s pripadajočo odpornostjo, ki je fizikalno veličina iste vrste. To upiranje je uspešno, dokler obremenitev ne preseže pripadajoče odpornosti. V trenutku, ko se to zgodi, sistem odpove [6].

Vemo, da se veriga pretrga pri najmanj odpornem členu, vendar le zato, ker so v tem mehanskem sistemu vsi členi enako obremenjeni. V večini bolj zapletenih mehanskih sistemov pa obremenitve niso

porazdeljene enakomerno po sestavnih delih in se spreminjajo tudi s časom. Polagoma se odpornosti manjšajo, zato bo odpovedal najprej tisti sestavni del, pri katerem bodo obremenitve najprej presegle njegovo odpornost.

Vpliv stalnih obremenitev na zdržljivost* mehanskih sistemov je že dokaj raziskan [3]. Skušali bomo prikazati, da je še bolj zanimivo raziskovanje vpliva spreminjajočih se obremenitev, saj so dinamični sistemi v vsakdanjih okoliščinah obremenjeni med obratovanjem prav na tak način.

2. PREIZKUS

Če nimamo pri roki primernega orodja, vemo, da je mogoče »prelomiti« kovinsko žico z večkratnim upogibanjem na istem mestu. Na osnovi te izkušnje je bil opravljen naslednji preprost preizkus s področja plastičnih deformacij. Okrogla jeklena žica s premerom 1,5 mm je bila na enem koncu trdo vpeta, drugi konec tega kosa žice pa je bil izmenoma upogiban za 90° v levo in desno, dokler se žica ni prelomila. Ugotovili smo, da se je žica prelomila povprečno pri osmem upogibu, ne glede na hitrost upogibanja in ne glede na trajanje ustavitve med posameznimi upogibi. To pomeni, da je prelom žice odvisen le od vložnega dela, ne glede na časovni potek pripadajoče vložene moči.

* Izraz »zdržljivost« (survivor function) bomo uporabljali v članku namesto izraza »zanesljivost« (reliability); slednjega bomo uporabljali v splošnejšem pomenu za opisovanje skupka vseh lastnosti sistema, ki so povezane z njegovimi odpovedmi zaradi obremenitev med obratovanjem. Zdržljivost sistema $R(t)$, je definirana kot verjetnost, da preživi sistem brez odpovedi trenutek t , torej da obremenitve do tega trenutka ne presežejo njegove odpornosti.

Ugotovili smo tudi, da debelejšje žice iz jekla iste vrste zdrže približno enako povprečno število upogibov, čeprav je za upogibanje potreben večji moment in je zato celotno vloženo delo, potrebno za prelom, večje. Če smo žico še dodatno segrevali ali natezali, je zdržala manj upogibov.

Nato smo celotni preizkus ponovili s kotom upogibanja, manjšim od 90° in ugotovili, da zdrži žica tem več upogibov, čim manjši je kot upogibanja.

Obnašanje žice med upogibanjem si razlagamo takole: žica je kristalni sistem, upogibanje pomeni zanjo obremenitev z momentom, ki povzroča spreminjanje kristalnega ustroja. Tem spremembam se žica upira, vendar se njena odpornost (pa tudi trdnost) polagoma manjša, saj se z vsakim upogibom pretrga del kristalnih vezi, dokler se pri zadnjem upogibu na obremenjenem mestu ne pretrgajo vse vezi in se žica prelomi. Število vezi, ki se pretrgajo pri vsakem upogibu, je naključno, zato je naključen tudi potek upadanja odpornosti žice. Če žico prenehamo upogibati, se kristalne vezi ne trgajo, zato se odpornost ne manjša.

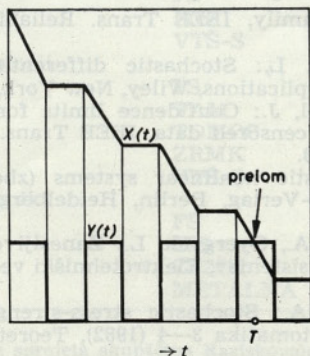
Pri zvišani temperaturi je zaradi močnejšega nihanja kristalne mreže trganje kristalnih vezi obsežnejše, zato se odpornost hitreje manjša. Tudi dodatno natezanje pospešuje trganje vezi in s tem manjšanje odpornosti. Temperatura in nateg sta poleg momenta za žico dodatni obremenitvi, ki pospešujeta zmanjševanje odpornosti.

Pri manjšem kotu upogibanja vnesemo v žico pri enem upogibu manj dela, zato se pretrga manj kristalnih vezi in žica zdrži več upogibov. Manjša obremenitev ima torej za posledico počasnejše zmanjševanje odpornosti.

3. POSTAVITEV MATEMATIČNEGA MODELA

Obnašanje žice med preizkusom je poenostavljeno prikazano na sliki 1. Odpornost $X(t)$ časovno monotonno pada in je odvisna od časovnega poteka obremenitve $Y(t)$. Žica se prelomi v trenutku, ko postane obremenitev in odpornost enaki.

Opisani preizkus in slika sta rabila za postavitev splošnega matematičnega modela odvisnosti tre-



Sl. 1. Načelna poteka obremenitve $Y(t)$ in odpornosti $X(t)$ žice pri upogibanju

nutne odpornosti sistema od njegovih preteklih obremenitev. Preizkus je pokazal, da je hitrost zmanjševanja odpornosti sistema sorazmerna z njegovo obremenitvijo. Če je to sorazmerje premo, velja $-\Delta X/\Delta t = \beta Y(t)$. Od tod izhaja linearna diferencialna enačba

$$\frac{dX}{dt} = -\beta Y(t); \quad X(0) = a \quad (1)$$

Tukaj sta začetna vrednost odpornosti a in hitrost zmanjševanja odpornosti na enoto obremenitve β naključni spremenljivki, zato je (1) stohastična diferencialna enačba [2]. Njena rešitev

$$X(t) = a - \beta \int_0^t Y(t) dt \quad (2)$$

velja za stohastični proces. Trenutek odpovedi T je naključna spremenljivka, ki jo dobimo kot rešitev stohastične enačbe

$$X(t) = Y(t) \quad (3)$$

V posebnem primeru, ko je obremenitev stalna, $Y(t) = Y$, je rešitev (2) enaka

$$X(t) = a - \beta Y t \quad (4)$$

kar da s (3) trenutek odpovedi

$$T = \frac{a}{\beta Y} - \frac{1}{\beta} \quad (5)$$

Diferencialna enačba (1) predstavlja linearni matematični model obnašanja sistema. Splošnejši matematični model je podan z nelinearno, nehomogeno stohastično diferencialno enačbo

$$\frac{dX}{dt} = -f(t, X; Y); \quad X(0) = a \quad (6)$$

v kateri je f nenegativen stohastični proces. Rešitev diferencialne enačbe (6) je stohastični proces $X(t)$. Tudi tukaj dobimo trenutek odpovedi s (3). Zdržljivost sistema izračunamo kot verjetnost

$$R(t) = P(T > t) \quad (7)$$

Če pa upoštevamo, da deluje na mehanski sistem hkrati več obremenitev $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$, ki se jim sistem upira s pripadajočimi odpornostmi $X_1, X_2, \dots, X_n$, modeliramo obnašanje mehanskega sistema s sistemom evlucijskih stohastičnih diferencialnih enačb

$$\begin{aligned} \frac{dX_1}{dt} &= -f_1(t, X_1, X_2, \dots, X_n; Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \\ \frac{dX_2}{dt} &= -f_2(t, X_1, X_2, \dots, X_n; Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \\ &\dots \\ \frac{dX_n}{dt} &= -f_n(t, X_1, X_2, \dots, X_n; Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \end{aligned} \quad (8)$$

z začetnimi pogoji $X_1(0) = a_1$, $X_2(0) = a_2$, ..., $X_n(0) = a_n$. Tukaj so $f_1, f_2, \dots, f_n$ nenegativni stohastični procesi, $a_1, a_2, \dots, a_n$ pa naključne spremenljivke. Rešitev sistema diferencialnih enačb (8) da naključne poteke vseh odpornosti $X_1(t)$, $X_2(t)$, ..., $X_n(t)$.

Še splošnejši kolikostni matematični model je naslednji:

Naj bodo $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ časovne funkcije, definirane na intervalu $[0, \infty)$, in $S_1, S_2, \dots, S_n$ množice bistvenih lastnosti mehanskega sistema. Tedaj so odpornosti sistema, ki so stohastični procesi, definirani na intervalu $[0, \infty)$, odvisni od obremenitev takole:

$$\begin{aligned} X_1 &= \Phi_1(Y_1, Y_2, \dots, Y_n; S_1) \\ X_2 &= \Phi_2(Y_1, Y_2, \dots, Y_n; S_2) \\ &\dots \\ X_n &= \Phi_n(Y_1, Y_2, \dots, Y_n; S_n) \end{aligned} \quad (9)$$

Z izenačitvami obremenitev s pripadajočimi odpornostmi

$$\begin{aligned} X_1(T_1) &= Y_1(T_1) \\ X_2(T_2) &= Y_2(T_2) \\ &\dots \\ X_n(T_n) &= Y_n(T_n) \end{aligned} \quad (10)$$

dobimo potencialne trenutke odpovedi $T_1, T_2, \dots, T_n$ kot naključne spremenljivke. Zdržljivost sistema je v tem primeru

$$R(t) = \min P(T_i > t) \quad (11)$$

Ko na osnovi konkretnih preizkusov na mehanskih sistemih ugotovimo pripadajoče zakonitosti (10) oziroma (9), je nadaljnji postopek reševanja enačb pri izbranih obremenitvah mogoče programirati računalniško.

ZGLED. Vzemimo, da smo s preizkusi ugotovili, da se mehanski sistem obnaša linearno, da torej velja zanj diferencialna enačba (1). Za ta sistem je treba določiti še vrednosti a in β . Pomagamo si lahko takole: Sistem izpostavimo najprej stalni obremenitvi Y_1 in z meritvami ugotovimo verjetnostno porazdelitev naključnega trenutka odpovedi T_1 . Nato izpostavimo sistem še stalni obremenitvi Y_2 in na enak način določimo pripadajoči naključni trenutek odpovedi T_2 . Zdaj s (3) in (4) zapišemo sistem stohastičnih algebrskih enačb

$$\begin{aligned} Y_1 &= a - \beta Y_1 T_1 \\ Y_2 &= a - \beta Y_2 T_2 \end{aligned} \quad (12)$$

v katerem sta neznanki a in β . Iz (12) dobimo rešitvi

$$a = \frac{Y_1 Y_2 (T_1 - T_2)}{Y_1 T_1 - Y_2 T_2} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_1 T_1 - Y_2 T_2} \quad (14)$$

Ker sta T_1 in T_2 naključni spremenljivki, sta tudi a in β naključni spremenljivki, njuno porazdelitev pa določimo s transformacijskimi pravili.

Ko smo s (13) in (14) določili a in β , lahko z (2) predvidimo trenutno vrednost odpornosti $X(t)$ za poljuben pretekli potek obremenitve $Y(t)$. Seveda je trenutna vrednost odpornosti $X(t)$ naključna spremenljivka, kar pomeni, da je potek odpornosti stohastični proces. Ko smo rešili (3), izračunamo zdržljivost mehanskega sistema s (7).

4. SKLEP

Obremenitve, ki delujejo na mehanski sistem, postopoma manjšajo njegovo odpornost, ki se s časom naključno monotonno manjša. Trenutna vrednost mehanske odpornosti je naključna spremenljivka, ki je odvisna od svoje začetne vrednosti in časovnega poteka vseh obremenitev do tega trenutka. Mehanski sistem odpove v trenutku, ko doseže katerakoli od obremenitev pripadajočo odpornost. Na trenutno vrednost zdržljivosti in drugih zanesljivostnih lastnosti mehanskega sistema vpliva celoten prejšnji potek vseh njegovih obremenitev in njegovih odpornostnih lastnosti.

Za zdaj, po zgledu elektronskih sistemov, povečujemo zdržljivost dinamičnih mehanskih sistemov na dva načina:

1. z vgrajevanjem zdržljivejših sestavnih delov,
2. z dodajanjem za delovanje odvečnih (redundantnih) sestavnih delov, ki prevzamejo vlogo tistih, ki so odpovedali.

Obstajajo pa še zaloge zanesljivosti, ki doslej niso bile izrabljene in mogoče še manj bremenijo ceno sistema. To je način z načrtno preureditvijo stroja mehanskega sistema tako, da so obremenitve posameznih sestavnih delov čimbolj usklajene z njihovo odpornostjo. Ta način je povezan z vnašanjem zanesljivosti že pri snovanju mehanskega sistema, na podlagi načrtovanih obremenitev in raziskanih odpornostnih lastnosti sestavnih delov.

Namen tega članka je bil na področju strojništva spodbuditi v tej smeri zanimanje za raziskovanje in vsakdanjo rabo.

LITERATURA

- [1] Afzal Beg, M.: Estimation of $\Pr\{Y < X\}$ for exponential family, IEEE Trans. Reliability 2 (1980), 158—159.
- [2] Arnold, L.: Stochastic differential equations: Theory and applications, Wiley, New York, 1974.
- [3] McCool, J.: Confidence limits for Weibull regression with censored data, IEEE Trans. Reliability 2 (1980), 145—150.
- [4] Stochastic nonlinear systems (zbornik referatov), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1981.
- [5] Žižek, A., Gyergyek, L.: Zanesljivost naključno obremenjenih sistemov, Elektrotehniški vestnik 5 (1981), 289—294.
- [6] Žižek, A.: Stochastic stress-strength model of reliability, Automatika 3—4 (1982), Teoretska priloga.