

XIII MIĘDZYNARODOWE KOŁOKWIUM
"MODELE W PROJEKTOWANIU I KONSTRUOWANIU MASZYN"
13th INTERNATIONAL CONFERENCE ON
"MODELS IN DESIGNING AND CONSTRUCTIONS OF MACHINES"
25-28.04. ZAKOPANE

VOJISLAV MILTENOVIĆ

University of Niš, Mechanical Engineering Faculty, Yugoslavia

MODELLIERUNG VON ALLMÄHLICHEN UND PLÖTZLICHEN AUSFÄLLEN VON MASCHINENSYSTEMEN

Inhaltsangabe. Das Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung der Methode, mit deren Hilfe die Prognose der Betriebsfestigkeit von Maschinensystemen noch in der Phase des Konstruierens ermöglicht wird. Die Methode basiert auf der statistischen Modellbildung von allmählichen und plötzlichen Ausfällen von Maschinensystemen. Der Algorithmus des Zuverlässigkeitsberechnungsverlaufes ist auch dargestellt.

1. Einführung

Der Ausfall von Maschinensystemen kann durch das Versagen einer Reihe seiner unterschiedlichen Elemente entstehen, Ausserdem ist die Zufälligkeit des Ausfalles durch Streuung der Haltbarkeitsmerkmale von Bauteilen und durch andere Faktoren bedingt.

Zwischen den Elementen eines Maschinensystems besteht meistens eine kräftige dynamische Verbindung, die auf die Identifizierung der Belastung von Bauteilen einen wesentlichen Einfluß hat.

Bei der Auswertung der Zuverlässigkeit des zusammengesetzten Maschinensystems müsste zuerst die Zuverlässigkeit der Systemelemente und danach auch die Zuverlässigkeit des Systems als Ganzes bestimmt werden. Es besteht bis jetzt noch keine Methode, die für ein mechanisches System mit Rücksicht auf seine Eigenschaften eine genaue Lösung dieser Aufgabe liefert. Die genauesten Methoden sind diejenigen, die sich auf die Modellierung von zum Ausfall führenden physikalischen Vorgängen stützen. Für die Realisierung dieser Methode ist der Gebrauch von Rechnern unerlässlich, da vermittels dieser das Verhalten des Systems unter verschiedenen Betriebsbedingungen, entsprechend den verschiedenen Belastungen der Sstembauteile modelliert wird. Dies akkumuliert aber die Ermüdung im Werkstoff, was zum Ausfall führt.

Die Simulation des Ausfallprozesses von realen Systemelementen ermöglicht die Ermittlung von geforderten Merkmalen und die Angabe der Zuverlässigkeit. Die dynamischen Verbindungen führen zu besti-

mmten Belastungen bei Bauteilen, was die Möglichkeit der Einschätzung der Zuverlässigkeit des ganzen Systems anbietet. Unter Einwirkung der Belastung in den Bauteilen eines Maschinensystems können prinzipiell 2 verschiedene Ausfalltypen auftreten: allmähliche und plötzliche.

Die Prognose des allmählichen Ausfalles ist mit der Modellierung im Laufe der Akkumulierung der physikalischen Ermüdung in Bauteilen des Maschinensystems unter bestimmten Bedingungen und Betriebsarten, verbunden.

Die Prognose des plötzlichen Ausfalles ist mit der Modellierung der ungünstigsten Faktoren verbunden und mit den zufälligen äußeren Einflüssen, die als Folge Überlastungen hervorrufen, die die Festigkeit der Systemteile überschreiten.

2. Modellierung von allmählichen Ausfällen

Die Methode besteht aus mehrfacher Modellierung der Maschinenfunktion unter verschiedenen Bedingungen und Betriebsarten. Dabei werden Belastungsverfahren und dessen Wirkung auf die Ermüdungsakkumulation im Werkstoff simuliert.

In der Abb.1 sind schematisch die Modellierung der Schädigungsprozesse und des Entstehens von allmählichen Ausfällen der Bauteile und des Systems dargestellt. Die Arbeitsvorgänge der Maschine werden anhand analytischer Ausdrücke und logischer Gleichungen modelliert. In jedem Schritt der Modellierung werden die Belastungen von Systemteilen, anhand Betriebsart, Umgebungseinfluß, der die Umfangs- oder translatorische Geschwindigkeiten bzw. Drehzahl bestimmenden kinetischen Parameter bestimmt. Die so berechnete Belastung ist quasistatisch.

Der Einfluss des dynamischen Verhaltens des System auf die Belastung der Bauteile kann mit bestimmter Genauigkeit über den Beiwert K_{ve} - für äusere dynamische Einflüsse und K_{vi} - für innere dynamische Einflüsse erfasst werden. Aufgrund der in solcher Weise bestimmten äquivalenten Belastung $W_{id}(T)$ (des d-ten Teils des Systems in der i-ten Modellierungsstufe) werden Betriebsspannung σ_{id} für den betrachteten Grenzzustand des Bauteiles und die Anzahl der Laständerungen $N_{id}(\Delta T)$, bei der die zum Ausdruck kommen, berechnet.

Die Gesamtschädigung im Material der Systembauteile in i-ter Stufe der Modellierung kann ausgedrückt werden als

$$R_i = R_{i-1} + A_i \quad (1)$$

wobei R_i und R_{i-1} - die Schadensakkumulation in entsprechenden Modellierungsstufen und,
 A_i - der Zuwachs der Schadensakkumulation in der Modellierungsstufe ΔT sind.

Der Zuwachs der Schadensakkumulation A_i hängt von der Spannung σ_i und der Laständerungszahl N_i ab und wird errechnet anhand einer Werkstoffschadensakkumulations-Hypothese.

Wenn wir den Zuwachs der Akkumulation mit

$$R_{1i} = \frac{R_i}{T} \quad (2)$$

beschreiben, dann kann man sagen, dass

$$R_{1i} = R_{1i-1} \left(1 - \frac{\Delta T}{T}\right) + \frac{A_i}{T} \quad (3)$$

Anhang der Gleichung (3) erfolgt die Berechnung des Wachstums der Schadensakkumulation (Ermüdungsakkumulation im Werkstoff während $1|h|$ Arbeit oder während der Fahrt von $1|km|$ bei mobilen Maschinen) für jeden von den betrachteten Teilen des Systems und in jedem Grenzzustand. Die einem Modellierungsspiel entsprechende Einsatzperiode T_U enthält, dabei, alle möglichen Betriebsarten und Betriebsbedingungen des Systems. Die Betriebsbedingungen und Arten sowie die Betriebsdauer des Systems können während der Modellierung geändert werden, wodurch eine große Anzahl von Kombinationen erreicht und die Genauigkeit der erhaltenen Ergebnisse erhöht wird.

Im nächsten Block wird das Gesamttempo der Schadensakkumulation nach relativen Betriebszeiten in verschiedenen Bedingungen γ_j immer vorgegeben sein.

Der Vergleich der so erhaltenen Werte für Werkstoffermüdungsakkumulation R_1 mit dem verfügbaren Maß (Haltbarkeit) des Bestandteiles R_{lim} erfolgt danach. Dabei muß man über die Kurve der Verteilung von Werkstoffhaltbarkeitsmerkmalen verfügen, aus welchem Werkstoff die Systembauteile hergestellt wurden.

Die Werte R_{lim} werden durch zufällige Auswahl, nach dem Verteilungsgesetz der Haltbarkeitsmerkmale des Werkstoffes, bestimmt. Als Ergebnis des Vergleiches ergibt sich die Bauteilresource für den betrachteten Grenzzustand in Bezug auf die angenommenen Merkmale.

Die Bauteilresource (Arbeitsumfang) Q_d ist gleich dem Mindestwert der errechneten Werte für verschiedene Grenzzustände.

In dieser Weise kann man auch die Systemresource Q_s , die dem Mindestwert Q_{di} gleich ist, erhalten. Die errechneten zufälligen Werte Q_d und Q_s werden für die Bestimmung des Verteilungsgesetzes die Resource bis zum Ausfallen der Bauteile und des Systems in der Gänze bestimmt.

Der beschriebene Vorgang der statistischen Modellierung bietet die Möglichkeit, die Änderung der Parameter und der Maschinenmerkmale in Betracht zu nehmen, abhängig von der Zeit oder dem Arbeitsumfang und den Betriebsbedingungen. Die Verteilung der Systemressourcen ergibt sich aus der Varierung der Bedingungen und der Betriebsart und der zufälligen Auswahl der Haltbarkeitsmerkmale der Bauteile.

Die Genauigkeit dieser Methode für die Abschätzung der Bauteile- und Systemressourcen hängt vollkommen von der Zahl der Prüfungen K_{ab} . Andererseits ist die Zahl der Prüfungen durch verfügbare Rechnerbetriebszeit eingeschränkt.

In der Abb.2 ist die Modellierungsergebnisse für verschiedene Schadensakkumulationshypothese dargestellt. Mit der Bezeichnung "MILTEN" ist die Ergebnisse von eigene Methode dargestellt [1].

3. Modellierung von plötzlichen Ausfällen

Die Modellierung von plötzlichen Ausfällen ist mit der Erscheinung der, die Festigkeit der Systembauteile überschreitenden Überlastung verbunden.

In der Abb.3 ist schematisch die Modellierung von plötzlichen unter Einwirkung von Höchstbelastungen entstandenen Ausfällen dargestellt. In jedem Modellierungsspiel ist es nötig, die im System

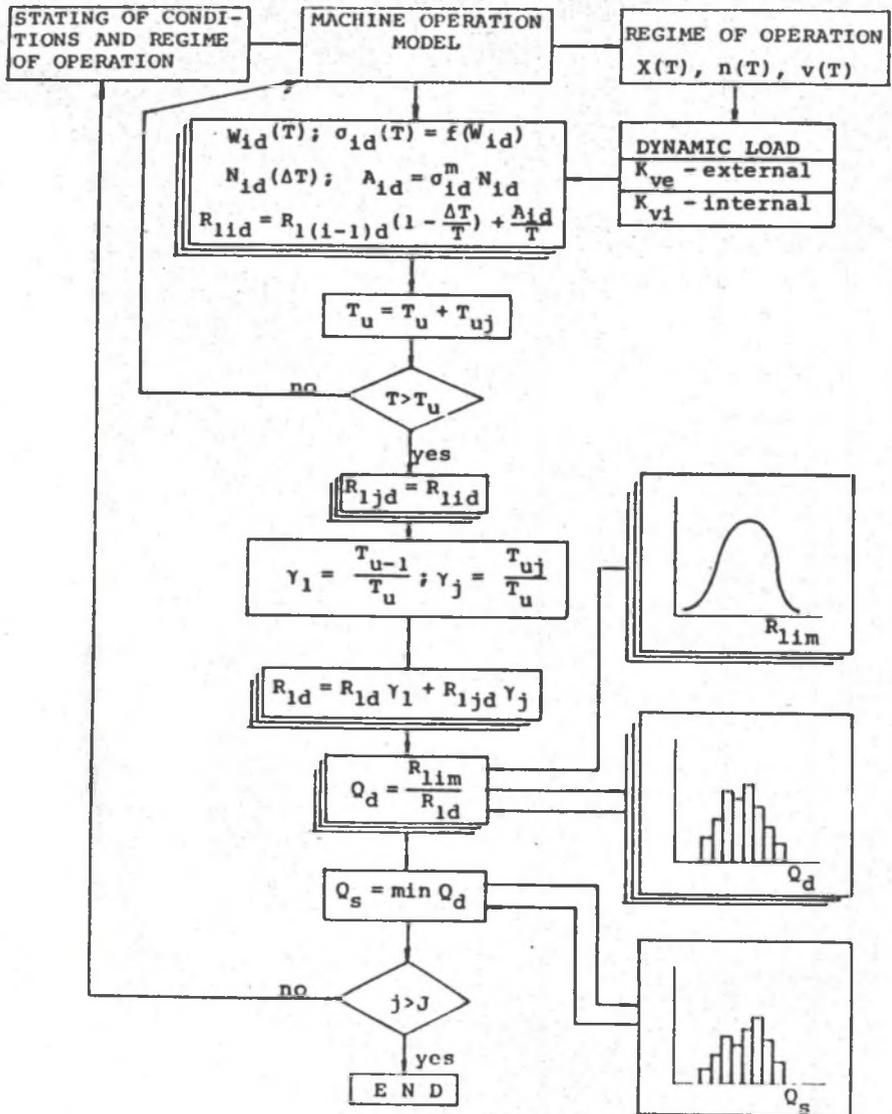


Abb. 1.

möglicherweise entstehende maximale Belastung X_{\max} zu bestimmen. Entsprechend dieser wird dann die max. Spannung von Systemteilen $\sigma_{i\max}$ errechnet. Der so erhaltene Wert für $\sigma_{i\max}$ wird dann mit dem Wert von σ_{raz} , der die Festigkeit des Bauteiles charakterisiert, verglichen. Der Wert für σ_{raz} wird gemäss dem vorgegebenen Verteilungsgesetz zufällig bestimmt. Danach erfolgt die Berechnung der Beziehung

$$S_{\sigma di} = \frac{\sigma_{\text{raz}}}{\sigma_{i\max}} \quad (4)$$

Das Minimum der entsprechend den unterschiedlichen Grenzzuständen für verschiedene Systembauteile erhaltenen $S_{\sigma di}$ - Werte ergibt den Beiwert $S_{\sigma s}$, der die Festigkeit des ganzen Systems charakterisiert.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit P wird nach dem beendeten Prozess der statistischen Modellierung als die Beziehung

$$P_{d(s)} = \frac{N_{\sigma d(s)}}{N} \quad (5)$$

bestimmt, worin N_{σ} - Anzahl der Fälle, in denen je Grenzzustand $S_{\sigma} < 1$,
 N - Anzahl der Prüfungen sind.

Hier kann sich als Problem die Bestimmung der Höchstbelastung des Systems herausstellen. Die Gesamtbelastung der Systembauteile sollte in Betracht nehmen:

- Belastung, die durch die Beherrschung des Widerstandes beim Sytebetrieb verursacht wird,
- die dynamische Belastung infolge der Umgebungseinwirkung,
- die durch die innere Systemdynamik verursachte dynamische Belastung.

Die durch die innere Systemdynamik verursachte dynamische Belastung charakterisiert die Wirkung von Schwingvorgängen und zusätzlichen Systembelastungen, die als Folge der Ungenauigkeiten in der Fertigung und Montage, der elastischen Verformungen von im Eingriff stehenden Bauteilpaaren (z.B. bei Zahnrädern und Lagern) sowie des Verschleisses von Systembauteilen zur Erscheinung kommen.

Die Zahnrädergetriebe, die den Bestandteil der meisten Maschinensysteme bilden, sind aktive Quellen von Schwingungserscheinungen im System, was grösstenteils von ihren konstruktiven und technologischen Parametern abhängig ist. Die technologischen Parameter bestimmen ganz wesentlich die Intenzität der Innenschwingungen des Systems wegen der nicht ausgewuchteten Drehteile des Getriebes und wegen der Ungenauigkeiten bei der Fertigung sowie wegen unterschiedlicher Verformungsstufen von Zahnradelementen.

Die Gestaltung von Schwingungsprozessen im System ist auch noch seitens der elastischen Trägheitsparameter der Systembauteile bestimmt, wobei ihre Grösse und die gegenseitige Verbindung von der Systemstruktur abhängig sind.

Die Dynamik des Systems und seine Belastungsart sind demnach bestimmt wie durch aussenliegende so auch innerliegende Schwingungsquellen. Bei der Planung von Maschinensystemen muß man deswegen auch die Unterschiede zwischen den von aussen her ergrufenen Schwingungsfrequenzen und den Eigenfrequenzen der Systembauteile beachten bzw. gefährliche Resonanzzonen sind zu vermeiden.

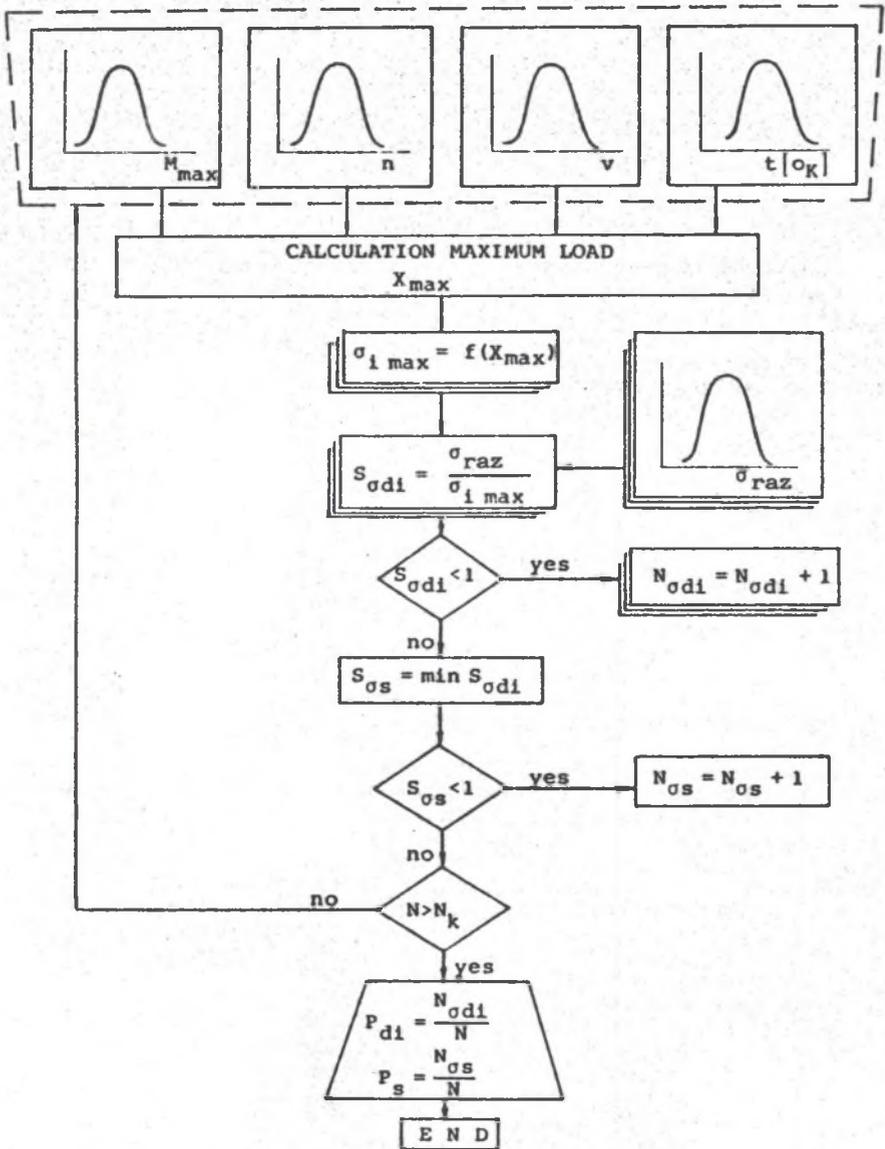


Abb. 3.

GROESENSORTIERTE LEBENSDAUERWERTE

CORTEN-DOLAN	CITOVIC	HAIBACH	MILTEN	SEREN. -KOGAEV
OR1	OR2	OR3	OR4	OR5
0. 130830E 08	0. 111635E 08	0. 104346E 08	0. 619954E 07	0. 273766E 07
0. 138150E 08	0. 117488E 08	0. 109775E 08	0. 652432E 07	0. 288960E 07
0. 152014E 08	0. 128414E 08	0. 120035E 08	0. 713634E 07	0. 316175E 07
0. 155297E 08	0. 131147E 08	0. 122641E 08	0. 727255E 07	0. 321187E 07
0. 163750E 08	0. 137398E 08	0. 127964E 08	0. 763676E 07	0. 340528E 07
0. 169160E 08	0. 141838E 08	0. 131632E 08	0. 786963E 07	0. 350897E 07
0. 169914E 08	0. 142120E 08	0. 131903E 08	0. 790159E 07	0. 354758E 07
0. 176687E 08	0. 147889E 08	0. 138269E 08	0. 821162E 07	0. 364044E 07
0. 179688E 08	0. 149868E 08	0. 139003E 08	0. 833258E 07	0. 370036E 07
0. 179847E 08	0. 149943E 08	0. 139954E 08	0. 833856E 07	0. 372912E 07
0. 183905E 08	0. 153296E 08	0. 142689E 08	0. 851285E 07	0. 378585E 07
0. 187400E 08	0. 156072E 08	0. 145737E 08	0. 867541E 07	0. 384879E 07

Abb. 2.

Für die Bestimmung von dynamischen Systembelastungen kann die transmissiende Funktion des Systems herangezogen werden, da diese die Amplituden- Frequenz- und Phasenmerkmale beinhaltet und auf Änderung von Ausseneinflüssen (Amplitude und Phase) beim Passieren des Systems hinweist.

4. Zusammenfassung

Die erarbeitete Prognose der Betriebsfestigkeit für Maschinensysteme bietet die Möglichkeit der gleichzeitigen Berücksichtigung einer großen Anzahl von zufälligen Parametern, die den Zustand des Systems unter den Einsatzbedingungen bestimmen. Die Betriebsfestigkeitsprognose der Maschinensysteme in der Phase des Planens und Konstruierens beruht auf der Analyse der zufälligen Vorgänge, die unter Einwirkung von Außeneinflüssen entstanden sind, auf der Analyse von dynamischen Verbindungen zwischen den Systemelementen, des Wahrscheinlichkeitscharakter der Haltbarkeit und der Änderungen in der Mikrostruktur des Werkstoffes während der Einsatzvorgänge. Die Funktion der Verteilung von Ressourcen der Bauteile und des Gesamtsystems, die nach dieser Methode erhaltbar ist, ergibt das Verhältnis zwischen der Lebensdauer des Systems und seiner Zuverlässigkeit bzw. Betriebsfestigkeit.

REFERENCES

- [1] V.Dj.MILTENOVIĆ: Beitrag zur Entwicklung einer Methode für die Zuverlässigkeitsprognose von Maschinensystemen, Dissertation, Mašinski fakultet Niš, 1982.
- [2] V.Dj.MILTENOVIĆ: Contribution for Determination the Reliability of mechanical Systems in the Engineering Design, Proc.of ICED'87, Bostom MA, USA, 1987.
- [3] E.GASSNER: Zur experimentellen Lebensdauerermittlung von Konstruktions-elementen mit zufallsartigen Beanspruchungen."Sonderdruck aus Materialprüfung". 1973.
- [4] K.S.KAPUR.,R.L.LAMBERSON: Reliability in Engineering Design. John Wiley & Sons, New York, 1984.

MODELLING OF DETERIORATIONAL AND RANDOM FAILURES OF MECHANICAL SYSTEMS**Summary**

This work considers the problem of establishing the time to failure (resource) that a system can realize in different conditions and regimes of operation. Because of great number of parameters of random nature which determine the operation conditions of the system, they are possible to define adequately only by methods of statistic modelling. This work analyses the possibility of deteriorational and random failures and is based on the theory of reliability. The algorithms of the calculation course of distribution of time to failure are shown too.

MODELOWANIE LOSOWYCH USZKODZEN SYSTEMOW MECHANICZNYCH**Streszczenie**

Praca dotyczy problemu określenia czasu niezawodności charakteryzującego układ w różnych warunkach i reżimach operacyjnych. Duża liczba parametrów o charakterze losowym wyznaczonych warunkami operacyjnymi układu może być stosownie zdefiniowana jedynie przy użyciu modelowania statystycznego. W pracy poddano analizie możliwość wystąpienia losowych zniszczeń wykorzystując teorię niezawodności. Przedstawiono algorytmy obliczeniowe rozkładu czasu niezawodności.

Recenzent: doc. dr inż. Z. Jaskóła

Wpłynęło do Redakcji 29.XII.1988 r.