EESTI NSV TEADUSTE AKADEEMIA TOIMETISED. XVIII KÖIDE
ÜHISKONNATEADUSED. 1969, Nr. 2

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК ЭСТОНСКОЙ ССР. ТОМ XVIII
ОБЩЕСТВЕННЫЕ НАУКИ. 1969, № 2

https://doi.org/10.3176/hum.soc.sci.1969.2.02

H. PAVELSON

ÜBER DIE MÖGLICHKEITEN ZUR ERHÖHUNG DER ZUVERLÄSSIGKEIT DER PRODUKTIONSSYSTEME

Verschiedene technische und ökonomische Gründe haben in den letzten Jahrzehnten einen raschen Zuwachs der Produktionsleistung pro Einheit von Einrichtungen für chemische und verwandte Industriezweige hervorgerufen. Auch macht sich die Tendenz merkbar, zwei oder mehrere aufeinanderfolgende Prozesse in einem Apparat durchzuführen, der dementsprechend größer und kostspieliger wird; doch die Vorzüge sowohl des geringeren Raumbedarfs als auch der Verminderung der Transportkosten und Parameterverluste können so groß sein, daß der Konstrukteur sich gezwungen sieht, die zusätzlichen Schwierigkeiten mit in den Kauf zu nehmen. Die Zusammenwirkung beider genannten Entwicklungsrichtungen hat es in den meisten Gebieten der chemischen Industrie dazu gebracht, daß Großanlagen projektiert und gebaut werden, in denen der Mehrteil der Prozesse in einigen komplizierten Apparaten vor sich geht. Die Einheitsleistungen solcher großer Mehrprozeßapparate entsprechen meist der vollen Produktionskapazität der Anlage.

Die hohen Kosten einzelner Apparatureinheiten machen die Aufgabe der Bestimmung der Produktionskapazität und des Zeitausnutzungskoeffizienten der projektierten Anlage besonders verantwortungsvoll. Es sollen dabei Mittel und Wege gefunden werden, die Leistung solcher Apparate voll auszunutzen. Um diese Aufgabe zu lösen, bedarf man der Kenntnis dessen, was ein Apparat an Dauerleistung geben kann und wie ein Produktionssystem, das solche unikale Einheiten enthält, auszubauen ist.

In den folgenden Ausführungen wird der Versuch gemacht, die Grenzen der Rentabilität verschiedener Maßnahmen für die Erhöhung der Ausfallsicherheit von Produktionssystemen festzustellen. Es werden dabei unter Ausfällen alle für Reparaturen notwendigen Stillstände der Einrichtungen gemeint (mit Ausnahme der planmäßigen Generalreparaturen der ganzen Anlage). Es wird also zwischen einer Panne und einer vorbeugenden Reparatur einzelner Elemente kein Unterschied gemacht, weil die Einwirkung auf das System dieselbe ist. Die Frage, wie groß die Längenunterschiede in beiden Fällen sind, benötigt einer speziellen Untersuchung.

Für die Bestimmung der Produktion eines Apparats genügt es, die Produktionsleistung in der Zeiteinheit und den Koeffizienten der Zeitausnutzung zu kennen. Bei den in kontinuierlichem Betrieb arbeitenden Apparaten hängt dieser Koeffizient nur von dem für die Reparaturen benötigten Zeitanteil ab.

Im einfachsten Falle eines Systems mit hintereinander geschalteten Elementen, ohne Reserveelemente oder Vorratsbehälter, kann der Koffizient der Zeitausnutzung der Anlage aus dem Verhältnis

$$\eta = \prod_{i=1}^{n} \eta_i \tag{1}$$

errechnet werden, wo η_i den entsprechenden Koeffizienten für das i-te Element bezeichnet. Wie es leicht zu ersehen ist, nimmt der Gesamtkoeffizient bei anwachsender Zahl der Elemente rasch ab; deshalb können solche Systeme bei größerer Zahl der Elemente nicht gebaut werden, oder es müssen die Ausfallsicherheiten der einzelnen Elemente eine nur schwer erreichbare Höhe haben.

Der Zeitausnutzungskoeffizient eines Systems kann entweder durch Einbauen von Reserveelementen oder durch Einrichtung von Vorratsbehältern zwischen aufeinanderfolgenden Produktionsphasen vergrößert werden [1]. Die Einschaltung von Reserveelementen ist die am öftesten angewandte Methode zum Erreichen einer erhöhten Zuverlässigkeit technischer Systeme. Die Theorie der Reservierung ist weitgehend ausgebaut [2, 3, 4, 7], insbesondere in der Anwendung auf Steuerungs- und Regelungssysteme.

Bei der Bestimmung der Zuverlässigkeit von Produktionssystemen können teils dieselben Methoden angewendet werden, die für Informationssysteme gebraucht werden. Es sind jedoch wesentliche Unterschiede vorhanden, welche die Anwendung spezifischer Rechenmethoden bedingen. Die Unterschiede bestehen z. B. in der Anwendbarkeit des Reservierens, in der Möglichkeit eines Ansammelns der Zwischenprodukte in Vorratsbehältern usw. In vorhandener Literatur sind die Fragen der Zuverlässigkeit der Produktionssysteme nur selten behandelt worden.

Die Zuverlässigkeitscharakteristiken einzelner Maschinen und Apparate

Wie bereits gesagt, wird die mögliche Produktion einer Maschine oder eines Apparats durch seine Produktionsleistung und den Koeffizienten der Zeitausnutzung bestimmt:

$$Q = q \cdot \eta \cdot t, \tag{2}$$

wo Q die Produktmenge in der Zeit t, q die Produktionsleistung pro Zeiteinheit und η der Koeffizient der Zeitausnutzung sind. Bezeichnen wir den Mittelwert der Zahl der Ausfälle des Apparats in der Zeiteinheit durch λ und den reziproken Mittelwert der Reparaturdauer durch μ, so bekommen wir für η den Ausdruck:

$$\eta = 1 - \frac{\lambda}{\mu}. \tag{3}$$

Bei vielen Typen von Einrichtungen ist es festgestellt worden, daß die Wahrscheinlichkeit der Dauer ausfallsloser Arbeit und der Dauer der Reparaturen sich durch die Poissonverteilung ausdrücken läßt. Es wäre dann

$$R_{0,t} = e^{-\lambda t} \tag{4}$$

$$G_{0,t} = 1 - e^{-\mu t}, \tag{5}$$

wo $R_{0,t}$ und $G_{0,t}$ die Wahrscheinlichkeiten dafür sind, daß die im Moment $t = 0$ zu arbeiten angefangene Maschine im Moment t noch nicht ausgefallen ist bzw. die im Moment $t = 0$ angefangene Reparatur im Moment t bereits beendet ist [4].

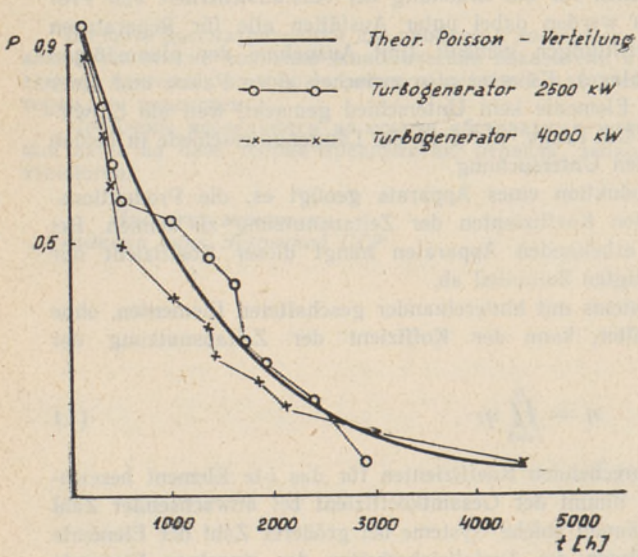

Abb. 1

Für weitere Ausführungen ist es wichtig zu prüfen, inwieweit die realen Verteilungen von $R_{0,t}$ und $G_{0,t}$ in kontinuierlichen Betriebsbedingungen und bei den bei uns angenommenen Methoden der Wartung und Reparatur duch die Poissonverteilung beschreibbar sind. Derartige Vergleiche sind an einigen Maschinengruppen der Zellstoff- und Papierfabrik in Kehra durchgeführt worden. Auf der Abbildung (Abb. 1 u. 2) werden die Verteilungen der Dauer ausfallsloser Arbeit und der Reparaturzeiten für die Turbogeneratoren (TB) 1 und 2,

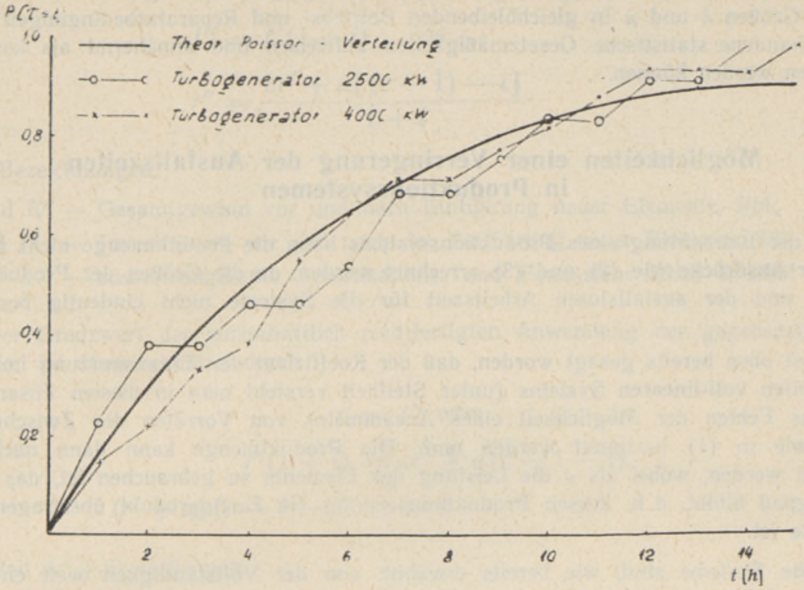

Abb. 2

sowie die Kurven der Poissonverteilung für dieselben Werte von λ und μ dargestellt. Die jährlichen Generalreparaturen sind von der Betrachtung ausgeschlossen. Die Beobachtungen umfassen einen Zeitraum von ungefähr 3 Jahren.

Die dargestellten Verteilungen stimmen im allgemeinen mit der theoretischen Verteilungskurve überein. Der Vergleich der beobachteten Verteilungen mit der Poissonverteilung mittels χ^2-Test [5, S. 484] gibt ebenso Übereinstimmungswahrscheinlichkeiten von 55,6 bis 66,3%.

Die Frage von der Anwendbarkeit der Poissonverteilung für die Beschreibung der Dauerverteilung ausfallsloser Arbeit und der Reparaturen kann also bejaht werden. Es sind genauere Untersuchungen notwendig, um eventuelle zeitliche Veränderungen der Verteilungskonstanten zu verfolgen und die Wirkung der vorbeugenden Reparatur auf die Häufigkeit und Länge der Ausfälle zu untersuchen. Es wäre nötig, in jeder Fabrik für jede Gruppe der installierten Einrichtungen die Verteilungsparameter λ und μ zu bestimmen und ihre Veränderung zu kontrollieren. Aus den so erhaltenen Ergebnissen könnte man wichtige Folgerungen über die Veränderung des Zustands der Einrichtungen bekommen. Auch wäre es möglich, für die zu bauenden Anlagen reale Produktionskapazitäten zu bestimmen. Leider werden die Angaben über Häufigkeit und Dauer der Ausfälle nicht systematisch gesammelt. Für die wichtigsten Typen der Einrichtungen werden nur die Zeitausnutzungskoeffizienten η festgestellt und sogar statistisch verarbeitet, doch reichen die Kenntnisse über die Größe dieses Koeffizienten nicht aus, richtige Mittel zur besseren Ausnutzung der Einrichtungen zu wählen.

Bemerkenswert ist im beschriebenen Beispiel die Übereinstimmung der Pannenhäufigkeit und der Reparaturdauer:

	TG 1	TG 2
$\lambda\,[h^{-1}]$	$7{,}47 \cdot 10^{-4}$	$7{,}25 \cdot 10^{-4}$
$\mu\,[h^{-1}]$	0,186	0,183

Der Unterschied beträgt nur 3 bzw. 2%, so daß die theoretische Poissonverteilung für die Ausfallshäufigkeit wie auch für die Reparaturdauer beider Turbogeneratoren durch ein und dieselbe Kurve dargestellt werden konnte. Eine so hohe Übereinstimmung beider Fälle ist ohne Zweifel zum guten Teil zufällig, zeigt aber gewissermaßen doch, daß die Größen λ und μ in gleichbleibenden Betriebs- und Reparaturbedingungen wirklich vorhandene statistische Gesetzmäßigkeiten aufweisen und annähernd als konstant angesehen werden können.

Möglichkeiten einer Verringerung der Ausfallszeiten in Produktionssystemen

Bei der Betrachtung eines Produktionssystems kann die Produktmenge nicht mittels einfacher Ausdrücke wie (2) und (3) errechnet werden, da die Größen der Produktionsleistung und der ausfallslosen Arbeitszeit für die Systeme nicht eindeutig bestimmbar sind.

Es ist oben bereits gesagt worden, daß der Koeffizient der Zeitausnutzung im Falle eines steifen voll-linearen Systems (unter Steifheit versteht man in diesem Zusammenhang das Fehlen der Möglichkeit eines Ansammelns von Vorräten der Zwischenprodukte) wie in (1) bestimmt werden muß. Die Produktmenge kann dann nach (2) berechnet werden, wobei als q die Leistung des Elements zu gebrauchen ist, das einen sog. Engpaß bildet, d. h. dessen Produktionsleistung (in Fertigprodukt übertragen) die niedrigste ist.

Solche Systeme sind, wie bereits erwähnt, von der Vollständigkeit weit entfernt. Reale Produktionssysteme sind nie völlig linear und — wenigstens in Industriezweigen mit chemischer Technologie — nie steif.

Es besteht keine allgemein anwendbare Methode für die Bestimmung der optimalen Struktur eines Systems. Die Wege für die Lösung dieser Aufgabe hängen von den konkreten Eigenschaften der Elemente und des Systems ab. Es wird hier versucht, mögliche Richtungen einer zweckmäßigen Gestaltung von Systemen zu beschreiben, die aus ungleichen Elementen bestehen. Unter Ungleichheit wollen wir bedeutende Unterschiede in Kompliziertheit und Wert der einzelnen Elemente verstehen. Wie schon am Anfang des Artikels erwähnt wurde, ist solche Ungleichheit des Werts von Einrichtungen in modernen Anlagen eine normale Erscheinung.

Die teuersten Apparate des Systems werden fast nie reserviert. Der Grund dafür ist einleuchtend — die Amortisation eines teueren Reserveapparats würde die Selbstkosten des Produkts mit beträchtlichen zusätzlichen Summen belasten; auch die Fondssteuer wächst proportional zum Wert der Einrichtungen. Es wäre jedoch nötig, diese Erwägungen quantitativ zu verfolgen und — wenn möglich — eine Grenze zu bestimmen, bis zu welcher die Vergrößerung der Zuverlässigkeit sich durch Einschaltung von Reserveelementen ökonomisch rechtfertigt.

Es seien die Rentabilität der Anlage (ohne Reserveelemente), die Amortisationsrate und der Fondssteuersatz gegeben. Teilen wir die ganze Anlage nach technologischen Merkmalen so in Produktionsphasen ein, daß eine Phase aus einem oder mehreren Elementen (Maschinen, Apparate) besteht, die genau dieselbe Operation (Operationen) durchführen, so können wir für jede Phase ihre Investitionsrate $i_k = \frac{I_k}{I}$ bestimmen, wo I_k und I die Investitionen entsprechend in die k-te Phase und in das ganze System bedeuten.

Wenn man im allgemeinen Fall in ein System neue Elemente einführt, und dadurch die installierte Produktionsleistung c-mal, die Investitionen $(1+i)$-mal vergrößert werden, können wir für die Rentabilität nach der Einführung neuer Elemente die folgende Gleichung schreiben:

$$r'' = \frac{K''}{I''},$$

$$K'' = c \cdot r' \cdot I' + [(c-1) - i] I' a,$$

$$I'' = I'(1+i) \quad \text{und}$$

$$r'' = \frac{cr' + a[(c-1) - i]}{1+i}$$

(Die Bezeichnungen:

K' und K'' — Gesamtgewinn vor und nach Einführung neuer Elemente, Rbl;

I' und I'' — Investitionen vor und nach der Einführung neuer Elemente, Rbl;

a — zusammengefaßte Amortisations- und Fondssteuersätze, Rbl/Rbl Fonds).

Der Grenzwert der wirtschaftlich rechtfertigten Anwendung der gegebenen Neuinvestition ist dann bestimmt durch

$$r' = r'' \quad \text{oder}$$

$$r'(1+i) = cr' + a(c-1-i),$$

$$(r'+a)(c-1-i) = 0.$$

Weil $(r'+a) \neq 0$, muß

$$c - 1 - i = 0 \tag{6}$$

sein. Also ist der Grenzwert der wirtschaftlich rechtfertigten Anwendung von Neuinvestitionen bestimmt durch den Anteil der neuen Investitionen am Wert der Gesamtanlage und durch den Produktionszuwachs.

Für den Fall, wo die Neuinvestition die Einführung eines Reserveelements in eine der Produktionsphasen darstellt, können wir die Beziehung zwischen c und der Zahl der Elemente in der Produktionsphase n feststellen.

Jedes Element der Produktionsphase hat eine (gleiche) Pannenhäufigkeit, die durch $(1-\eta)$ charakterisiert wird, wo η der Zeitausnutzungskoeffizient des Elements ist (oder, was dasselbe ist, die Wahrscheinlichkeit der pannenlosen Arbeit). Die Wahrscheinlichkeit der Arbeitsfähigkeit von genau i Elementen von der Gesamtzahl $(n+1)$ $(i \leqslant n+1)$ ist gleich

$$\frac{n+1}{i!(n-i+1)!} \cdot \eta^i (1-\eta)^{n-i+1}.$$

Wir können den letzten Ausdruck als das $(n-i+2)$-te Glied der binomischen Entwicklung des Ausdrucks $[\eta + (1-\eta)]^{n+1}$ ansehen. Ist für die Erreichung der Nominalleistung der Phase das Funktionieren von n Elementen genügend, so können wir für die Produktionsleistung der Phase N die folgenden Ausdrücke schreiben:

$$\begin{cases} N = \dfrac{i}{n} N_0, & \text{wenn} \quad i \leqslant n \\ N = N_0 \quad , & \text{wenn} \quad i > n, \end{cases}$$

wo N_0 die Nominalleistung bezeichnet.

Die mathematische Erwartung für die Produktmenge dieser Phase in der Periode des Funktionierens von genau i Elementen ist

$$q_i = \frac{i}{n} \frac{n+1}{i!(n-i+1)!} \cdot \eta^i (1-\eta)^{n-i+1} N_0 T,$$

und die Erwartung für die gesamte Produktmenge in der Zeit T

$$q=\sum_{i=1}^{n+1} q_i=\left[\eta^{n+1}+\frac{n}{n}\binom{n+1}{1}\eta^{n}(1-\eta)+\right.$$

$$\left.+\frac{n-1}{n}\binom{n+1}{2}\eta^{n+1}(1-\eta)^2+\ldots+\frac{1}{n}\binom{n+1}{n}\eta(1-\eta)^n\right]N_0T=$$

$$=\eta\frac{n+1}{n}\left\{-\frac{1}{n+1}\eta^n+\left[\eta^n+\binom{n}{1}\eta^{n-1}(1-\eta)+\right.\right.$$

$$\left.\left.+\ldots+(1-\eta)^n\right]\right\}N_0T=$$

$$=\eta\frac{n+1}{n}\left(1-\frac{1}{n+1}\eta^n\right)N_0T \quad \text{und}$$

$$c=\frac{q_{n+1}}{q_n}=\frac{\left(\frac{n+1}{n}\eta-\frac{1}{n}\eta^{n+1}\right)N_0T}{\eta N_0T}=$$

$$=\frac{n+1}{n}-\frac{1}{n}\eta^n.$$

Setzen wir nun in (6) die Werte von $c=\frac{n+1}{n}-\frac{1}{n}\eta^n$ und $i=\frac{ik}{n}$ ein, so bekommen wir

$$\frac{n+1}{n}-\frac{1}{n}\eta^n-1-\frac{ik}{n}=0, \quad \text{oder}$$

$$i_k+\eta^n=1.$$

Diese Beziehung ist auf Abb. 3 dargestellt. Wie man sehen kann, ist das Reservieren von ein oder zwei Apparaten nur bei niedrigen Anteilkosten derselben berechtigt. Wächst die Zahl der Apparate in der Produktionsphase, so steigt die Grenze der Anwendbarkeit des Reservierens rasch an. Die Entwicklung des Apparatebaus ist aber, wie schon oben gesagt, im Gegenteil aufs Projektieren von Apparaten gerichtet, deren Einheitsleistung der vollen Produktionskapazität der Anlage entspricht.

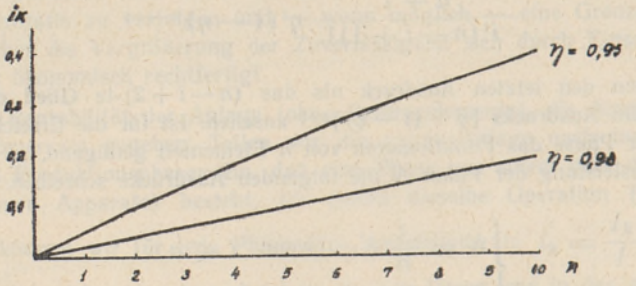

Abb. 3

Es muß unterstrichen werden, daß hier nur von der ökonomischen Zweckmäßigkeit des Reservierens die Rede ist. Die Entscheidung über die Notwendigkeit des Reservierens kann eventuell aus ganz anderen Gründen (Vorbeugung der Unfälle usw.) getroffen werden.

Es kann also das Reservieren nicht als eine allzu weit anwendbare Methode für die Erhöhung der Zuverlässigkeit des Systems angesehen werden.

Außer dem Reservieren besteht für die Erreichung derselben Ziele noch die Methode der Einführung von Vorratsbehältern zwischen den einzelnen Produktionsphasen. Das Vorhandensein solcher Behälter gibt den Phasen einige Unabhängigkeit voneinander und ermöglicht beim Ausfall einer Phase das Weiterarbeiten des Systems innerhalb einer gewissen Periode.

Die Theorie der linearen Systeme mit Behältern wird in [6] und [7] auseinandergesetzt. Sie geht von der Voraussetzung aus, daß alle Produktionsphasen (aufs Endprodukt übertragen) die gleiche Leistung haben.

Bei dieser Voraussetzung ist die Veränderung des Vorrats in Behältern nur beim Ausfallen einer der Phasen möglich; während einer Periode ausfallsloser Arbeit bleiben alle Vorräte auf dem Niveau vom Moment der Beseitigung der letzten Panne.

Der Erwartungswert des Koeffizienten der Zeitausnutzung eines solchen Systems kann nur für den Fall von 2 Produktionsphasen (Teilsystemen) genau errechnet werden.

Es ist $\eta = 1 - (P_2 + P_1\Psi)$, mit

$$P_1 = \frac{\lambda_1/\mu_1}{1 + \lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2},$$

$$P_2 = \frac{\lambda_2/\mu_2}{1 + \lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2},$$

$$\psi = \begin{cases} \dfrac{\nu - 1}{\nu \exp\left[\Theta \dfrac{\nu - 1}{\nu + 1}\right] - 1}, & \text{wenn } \nu \neq 1, \\[2ex] \dfrac{1}{1 + \Theta/2}, & \text{wenn } \nu = 1, \end{cases}$$

$$\nu = \frac{\lambda_2/\mu_1}{\lambda_1/\mu_2}, \qquad \Theta = l\,\frac{\lambda_1\mu_2 + \lambda_2\mu_1}{\lambda_1 + \lambda_2},$$

wo l das Volumen des Behälters zwischen den Phasen bedeutet und die Indizes 1 und 2 entsprechend das 1. und 2. Teilsystem bezeichnen [7, S. 142–143].

Für die Berechnung der Systeme, die aus mehreren Teilsystemen (Phasen) bestehen, ist in [6] ein Iterationsverfahren ausgearbeitet, welches von denselben Voraussetzungen ausgeht.

Die eben geschilderte Methode ist für Produktionssysteme mit kontinuierlicher chemischer Technologie nicht anwendbar. Dessen Ursache liegt vor allem darin, daß die Produktionsleistungen einzelner Phasen nie so genau einander gleich sein können, daß die Niveaus in Behältern während oft mehrere hundert Stunden dauernder panneloser Arbeit beständig bleiben. Da die Behälter auch für andere Zwecke dienen (zur Homogenisierung der Zwischenprodukte, zur Versicherung der Arbeit von Pumpen usw.), ist es vielmehr nötig, daß die Behälter normalerweise bis zu einem Mindestniveau gefüllt sind. Diese Bedingung steht im Gegensatz zu denen, wovon die oben beschriebene Theorie abgeleitet ist.

Auf der Suche nach praktisch brauchbaren Lösungen des Problems ist es notwendig, die Arbeitsbedingungen eines Produktionssystems zu betrachten, dessen einzelne Phasen ungleiches Leistungsvermögen besitzen. Dieses führt bekannterweise zum Auftauchen von Engpässen, die eigentlich die Produktion begrenzen, weil sie die niedrigste Leistung haben.

Wenn das System nun solche Phasen erhält, die aus bedeutend komplizierteren und auch teuereren Elementen als die übrigen bestehen, wäre es folgerichtig, die Produktionsleistung der Phasen mit billigerer Ausrüstung etwas höher zu projektieren. Das ermöglicht die volle Ausnutzung des Leistungsvermögens der teuereren Elemente. In solchem Falle wird die Menge der Fertigproduktion letzten Endes immer nur vom Koeffizienten der Zeitausnutzung der Phase (Phasen) mit niedrigster Leistung (die auch die komplizierteste ist) bestimmt, weil die Zwischenproduktverluste infolge der Ausfälle anderer Phasen in Vorratsbehältern im Laufe einer leicht bestimmbaren Periode nachgeholt werden können. Die Länge dieser Periode hängt nur von der Größe der Leistungsdifferenz und vom Behältervolumen ab, wenn die Phase mit niedrigster Leistung ununterbrochen weiterarbeiten kann.

Von solchen Erwägungen ausgehend kann man die wirtschaftlich rechtfertigte Höchstgrenze des Behältervolumens und der entsprechenden Differenz der Produktionsleistungen der komplizierten und einfachen Einrichtungen feststellen. Haben wir ein Produktionssystem, das aus $k_1 + 1 + k_2$ Phasen besteht, wo k_1 und k_2 entsprechend die Zahl der kompliziertesten Phase der vorangehenden und der darauf folgenden Phasen bedeuten, wobei wir die Werte von λ und μ des vorangehenden Teils des Systems durch λ_1 und μ_1, des kompliziertesten Apparats durch λ_0 und μ_0 und des folgenden Teils durch λ_2 und μ_2 bezeichnen, so können wir für η_1 den Ausdruck

$$\eta_1 \approx 1 - (\lambda_1/\mu_1 + \lambda_0/\mu_0 + \lambda_2/\mu_2)$$

schreiben.

Wenn wir nun vor und nach dem kompliziertesten Apparat Zwischenproduktbehälter einbauen, deren Volumen (in Arbeitsstunden gemessen) entsprechend Θ_1 und Θ_2 ist, können wir aus der Poisson-Gleichung die Wahrscheinlichkeit dafür finden, daß das Volumen des Behälters vor oder nach dem kompliziertesten Apparat ausreicht, um die ausfallslose Arbeit des letzteren bei einer Panne im vorangehenden bzw. folgenden Teil zu sichern (es muß dabei, wie es leicht zu verstehen ist, der erste Behälter normalerweise voll und der zweite leer gehalten werden). Die genannten Wahrscheinlichkeiten sind dann gleich

$$y_1 = 1 - e^{-\mu_1\Theta_1},$$
$$y_2 = 1 - e^{-\mu_2\Theta_2}.$$

Bezeichnen wir weiter durch τ_1 und τ_2 die Zahl der Stunden, im Laufe welcher das Normalniveau im ersten bzw. zweiten Behälter nach Ende einer Panne wiederhergestellt sein muß, dann ist die Wahrscheinlichkeit dessen, daß im entsprechenden Behälter bis zur nächsten Panne das Normalniveau hergestellt ist, gleich

$$x_1 = e^{-\lambda_1\tau_1},$$
$$x_2 = e^{-\lambda_2\tau_2}.$$

Es ist natürlich, entsprechend $y_1 = y_2$ und $x_1 = x_2$ anzunehmen. Dann ist

$$c - 1 = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_1} > \frac{xy(\lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2)}{1 - (\lambda_1/\mu_1 + \lambda_0/\mu_0 + \lambda_2/\mu_2)}.$$

Es ist nicht schwer zu zeigen, daß wir ohne großen Fehler

$$c - 1 = \frac{xy(\lambda_1/\mu_1 + \lambda_2/\mu_2)}{1 - (\lambda_1/\mu_1 + \lambda_0/\mu_0 + \lambda_2/\mu_2)} \tag{7}$$

setzen können.

Weiter führen wir folgende Bezeichnungen ein:

i_B — Anteil der einfachen Einrichtungen, deren Leistung zu vergrößern ist, am Wert der ganzen Anlage, Rbl/Rbl,

i_V — Verhältnis des Wertes eines Behälters für einstündige Produktion zum Wert der ganzen Anlage.

Dann können wir den Anteil der Neuinvestierungen am Wert der ganzen Anlage i wie folgt ausdrücken:

$$i = i_V(\Theta_1 + \Theta_2) + i_B \frac{k_1}{k_1 + k_2} \frac{\Theta_1}{\tau_1} + i_B \frac{k_2}{k_1 + k_2} \frac{\Theta_2}{\tau_2} \tag{8}$$

(es wird hier die Voraussetzung gemacht, daß alle einfacheren Produktionsphasen denselben Wert haben).

Die Werte von $(c-1)$ aus (7) und i aus (8) in (6) einsetzend, und nach Ersetzung von $\theta = \frac{\ln(1-y)}{\mu}$ und $\tau = \frac{\ln x}{\lambda}$ bekommen wir

$$\frac{xy(\lambda_1/\mu_1+\lambda_2/\mu_2)}{1-(\lambda_1/\mu_1+\lambda_0/\mu_0+\lambda_2/\mu_2)}+i_V\ln(1-y)\left(\frac{1}{\mu_1}+\frac{1}{\mu_2}\right)-$$
$$-\frac{i_B\cdot\ln(1-y)}{(k_1+k_2)\ln x}\left(k_1\frac{\lambda_1}{\mu_1}+k_2\frac{\lambda_2}{\mu_2}\right)=0. \quad (9)$$

Um die Gleichung übersichtlicher zu machen, können wir weitere Kürzungen einführen; wir können z. B.

$$\lambda_1 = k_1\lambda_0, \quad \lambda_2 = k_2\lambda_0 \quad \text{und} \quad \mu_1 = \mu_2 = \mu_0$$

setzen, und bekommen

$$\frac{(k_1+k_2)xy}{1-(k_1+k_2+1)\lambda_0/\mu_0}+2i_V\frac{\ln(1-y)}{\lambda_0}-i_B\frac{k_1^2+k_2^2}{k_1+k_2}\frac{\ln(1-y)}{\ln x}=0.$$

Bei Einsetzung von folgenden Werten

$$i_V = 0{,}001 \ \text{Rbl/Rbl},$$
$$\lambda_0 = 0{,}002 \ \text{1/Stunde}, \quad \mu_0 = 0{,}2 \ \text{1/Stunde},$$
$$k_1 = k_2 = 5 \ \text{und} \ 10$$

bekommen wir für i_B folgende Werte

x $(=y)$	k_1 $(=k_2)$	i_B
0,9	5	0,062
0,9	10	0,084
0,7	5	0,252
0,7	10	0,316
0,5	5	0,425
0,5	10	0,563

Wie die angeführten Zahlenwerte zeigen, ist auch diese Methode der Erhöhung der Produktionskapazität eines Systems nur in ziemlich engen Grenzen anwendbar.

Es wäre von Interesse festzustellen, ob die gleichzeitige Anwendung der beiden Methoden, d. h. des Reservierens und des Einbauens von Behältern nicht in weiteren Grenzen anwendbare Resultate gibt.

LITERATURVERZEICHNIS

1. G. Klaus, Wörterbuch der Kybernetik. Berlin, Dietz-Verlag, 1967.
2. Б. В. Гнеденко, Курс теории вероятностей. М., «Наука», 1965.
3. Математическая теория надежности информационно-логических управляющих устройств. Изд-во Ленинградского университета, 1966.
4. А. Л. Райкин, Модели замены ненадежного оборудования. М., «Знание», 1967.
5. E. Weber, Grundriß der biologischen Statistik. Jena, VEB G. Fischer Verlag, 1967.
6. Б. А. Севастьяков, Задача о влиянии емкости бункеров на среднее время простоя автоматической линии станков. «Теория вероятности и ее применения», 1962. Т. VII, 4.
7. А. Л. Райкин, Элементы теории надежности для проектирования технических систем. М., «Сов. Радио», 1967.

Institut für Ökonomie der Akademie der Wissenschaften der Estnischen SSR

Eingegangen am 8. Juli 1968

H. PAVELSON

TOOTMISSÜSTEEMIDE TÖÖKINDLUSE SUURENDAMISE VÕIMALUSTEST

Resümee

Eeldatakse, et süsteemi elementide tõrketu tööaeg ning remondi kestus on kirjeldatavad Poisson'i jaotusega. Selle eelduse paikapidavust kontrollitakse mõnede seadmegruppide tegeliku ekspluateerimise tulemusega.

Käsitletakse faktoreid, mis piiravad tootmissüsteemi töökindluse suurendamise otstarbekust üksikutesse tootmisfaasidesse reservelementide sisseviimise teel ning leitakse vastav seos. Tuuakse graafik reserveerimise majanduslikult õigustatud astme kohta.

Artikli viimases osas käsitletakse võimalusi tootmissüsteemi töökindluse suurendamiseks reservmahutite sisseviimise teel. Leitakse vastav seos ja esitatakse näide.

Selgub, et reserveerimine on kasutatav eelkõige tootmisfaasides, mille seadmete kogumaksumus ei moodusta üle 10—20% süsteemi kogumaksumusest. Kalleid unikaalseid seadmeid sisaldavates süsteemides on reservmahuteid otstarbekohane rakendada selleks, et tagada nende seadmete võimsuse täielik kasutamine.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Majanduse Instituut

Saabus toimetusse
8. VII 1968

Х. ПАВЕЛСОН

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Резюме

Предполагается, что время безотказной работы и длительность ремонта каждого элемента системы могут быть описаны при помощи распределения Пуассона. Эта предпосылка проверена на данных производственной эксплуатации отдельных групп оборудования.

Изучены факторы, ограничивающие повышение надежности системы путем введения в отдельные фазы производства резервных элементов; определена соответствующая зависимость. Приводится график предельной экономически целесообразной степени резервирования.

В последней части статьи изучены возможности для повышения надежности производственных систем путем введения емкостей. Здесь также найдена математическая зависимость и приведен пример.

Результаты показывают, что резервирование применимо прежде всего в таких фазах, где стоимость оборудования не превышает 10—20% от общей стоимости установки. В системах, содержащих уникальные дорогостоящие элементы, для обеспечения полного использования их мощности целесообразно ввести промежуточные емкости.

Институт экономики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
8/VII 1968