

DIE OPTIMIERUNG DES REGELSYSTEMS EINES KRAFTWERKSDAMPFKESSELS

Von

J. CZINDER

Institut für Wärme- und Systemtechnik, Technische Universität, Budapest

Eingegangen am 1. November, 1978

Vorgelegt von Prof. Dr. I. SZABÓ

1. Einleitung

Das Bestreben nach einer wirtschaftlicheren Energieerzeugung stellt zugleich erhöhte Ansprüche an das Regelsystem des Kraftwerkblocks. Deshalb erwies es sich als erforderlich, bei den Untersuchungen des Regelsystems eines Kraftwerkblockes — dabei in erster Linie des Dampfkessels — die Behandlung des Regelsystems als Mehrfachsystem einzuführen.

Die Abhandlung befaßt sich mit dem Regelsystem eines ölbeheizten Naturumlaufdampfkessels eines 150 MW-Blocks, der im Kraftwerk DUNAMENTI in Betrieb ist. Die Arbeit beschreibt das ausführliche axiomatische Blockschaltbild des Dampfkessels, weiterhin wird — auf der Basis experimenteller Kennwertermittlung — das mathematische Modell vorgestellt, das wegen der Nichtlinearitäten in der Umgebung eines gegebenen Arbeitspunktes (bei 92- bis 96%iger Last) gültig ist. Eine der Möglichkeiten zur Systemoptimierung, die Parameteroptimierung, wird durch die Untersuchung eines zweckdienlich gewählten Zweifachsystems des Dampfkessels veranschaulicht.

2. Der Dampfkessel als Mehrfachstrecke und sein dynamisches Modell

Der untersuchte Dampfkessel hat einen dreistufigen Überhitzer und einen zweistufigen Zwischenüberhitzer. Die nominelle Dampfleistung beträgt $D = 500$ t/h; die Frischdampfparameter sind: $p = 140$ at, $\vartheta_2 = 570$ °C. Mit der Anlage sind 9 Hauptregelaufgaben verbunden.

Nachdem es sich hier um eine in Betrieb befindliche Einrichtung handelt, stützt sich das mathematische Modell des Systems hauptsächlich auf die Ergebnisse der im Betrieb durchgeführten dynamischen Messungen. Zur entsprechenden Vorbereitung und Abwicklung der experimentellen Untersuchungen sowie zur richtigen Auslegung der Antwortfunktionen vermittelt die gründliche Kenntnis des axiomatischen Systemmodells der Mehrfachstrecke nützliche Informationen. Dazu dient das ausführliche Blockschaltbild der Mehrfachstrecke in Abb. 1.

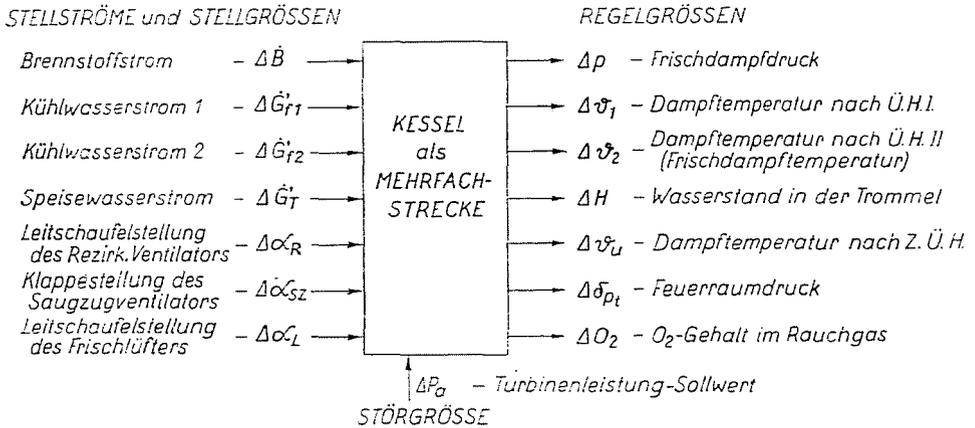


Abb. 2. Ein- und Ausgangssignale des Kessels

Bei den dynamischen Messungen wendeten wir geeignete Veränderungen der Stellgrößen, der Stellströme und der Störgrößen als Eingangstestsignale an und registrierten die Abläufe der Regelgrößen als Ausgangssignale. Die Ein- und Ausgangssignale sind in Abb. 2 übersichtlich.

Die durch Messungen erhaltenen Antwortfunktionen (größtenteils Übergangsfunktionen), die wir in [1] behandelten, wurden nach den sogenannten graphoanalytischen Methoden ausgewertet [2]. Die Dynamik der resultierenden Wirkungsketten zwischen den Ein- und Ausgangssignalen werden also mit Übertragungsfunktionen beschreiben, die in Tafel 1 zusammengefaßt sind. Die Bestimmung des Klemmenverhaltens zwischen gewissen Ein- und Ausgangssignalen bedingt aber weitere Untersuchungen (z. B. analoge Simulation) wegen der Temperaturregelkreise in Serienschaltung, wobei wir selbstverständlich von den entsprechenden Übertragungsfunktionen in Tafel 1 ausgehen. Diese Methode wurde auch bei der Aufstellung der im folgenden untersuchten kanonischen Struktur des Zweifachsystems angewendet [1].

3. Parameteroptimierung

Für die Optimierungsuntersuchungen wurde das System eingeschränkt. So untersuchen wir im folgenden nur das aus den Druck- und Temperaturregelkreisen des Kessels bestehende Zweifachsystem, dessen Matrixblockschaltbild in Abb. 3 veranschaulicht wird. Dieses System ist — unter Beibehaltung der betrieblich ausgebauten Regelkonzeption — eine sogenannte Hilfsregelgrößenausgestaltung. In der Abbildung ist

$$x_R = \begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta\vartheta_2 \end{bmatrix}; \quad x_s = \begin{bmatrix} \Delta p_d \\ \Delta\vartheta_{s2} \end{bmatrix}; \quad y_M = \begin{bmatrix} \Delta\dot{B} \\ \Delta\dot{G}_{f2} \end{bmatrix} \text{ und } z = \Delta P_a$$

Tafel 1

Durch Messungen ermittelte Übertragungsfunktionen des Kessels (Kessellast: 92—96%)

Regelkreise		Druck	Temperatur nach Ü. H. I.	Temperatur nach Ü. H. II.	Wasserstand	Temperatur nach Z. Ü. H.	Feuerraumdruck	Verbrennung	Störung
Ausgangsgrößen		$\Delta \dot{B}$ t/h	$\Delta \dot{G}_I$ t/h	$\Delta \dot{G}_II$ t/h	$\Delta \dot{G}_T$ t/h	Δz_R %	Δz_{S_2} %	Δz_L %	ΔP_n MW
Regelgrößen	Δp at	$\frac{2,24}{(1+15s)(1+180s)}$	$\frac{0,23}{1+168s}$	$\frac{0,23}{1+168s}$	$-\frac{0,000361}{s(1+95s)}$	$-\frac{0,025}{(1+3s)(1+30s)^2}$	$-\frac{1,085}{(1+31s)(1+61s)^2}$	$-\frac{0,059}{(1+10s)(1+69s)}$	$-(0,542 + \frac{1,41}{1+240s})$
	$\Delta \theta_1$ °C	$1,54 \frac{1+510s}{(1+73s)^5}$	$-\frac{3,14}{(1+33s)(1+69s)^2}$		$-\frac{0,0236}{(1+45s)^3}$	$-\frac{0,23}{(1+11s)(1+33s)}$	$-\frac{0,131}{(1+28s)(1+182s)^2}$	$\frac{0,338}{(1+96s)^2}$	$-0,425 \frac{1+985s}{(1+112s)^3}$
	$\Delta \theta_2$ °C	$1,46 \frac{1+572s}{(1+108s)^4}$	$-\frac{3,32}{(1+13s)(1+69s)^2}$	$-\frac{4,22}{(1+11s)(1+25s)^2}$	$\frac{0,094}{(1+17s)(1+53s)^2}$	$\frac{0,22}{(1+10s)(1+92s)}$	$-\frac{0,131}{(1+13s)(1+131s)^2}$	$\frac{0,36}{(1+38s)(1+196s)}$	$-0,33 \frac{1+2250s}{(1+133s)^3}$
	ΔH mm	$-\frac{0,424}{s(1+27s)^7}$	$-\frac{0,0338}{s(1+43s)^{7,5}}$	$-\frac{0,0615}{s(1+65s)^6}$	$\frac{0,0158}{s(1+27s)}$	$\frac{0,0128}{s(1+23s)^{8,5}}$	$\frac{0,0076}{s(1+130s)}$	$\frac{0,0107}{s(1+111s)}$	$\frac{0,0933(1-152s)}{s(1+98s)(1+140s)}$
	$\Delta \theta_{II}$ °C	$\frac{224s}{(1+103s)^2} \frac{1,1(1+840s)}{(1+168s)^5}$	$\frac{1,38}{(1+67s)^2(1+161s)^2}$	$-\frac{2,70}{(1+48s)(1+310s)^2}$	$-\frac{0,035}{(1+60s)^2} \cdot e^{-9s}$	$\frac{0,397}{(1+135s)(1+32s)^2}$	$\frac{0,105}{(1+80s)^2}$	$\frac{0,46}{(1+90s)(1+148s)}$	
	$\Delta \delta_{pt}$ mmWs	$-\frac{0,30}{1+120s}$					0,523	-0,44	
	ΔO_2 %	$-\frac{0,10}{(1+43s)^5} \cdot e^{-47s}$					$\frac{0,0335}{(1+9s)(1+26s)^5}$		
Hilfsregelgrößen	Δp_d at	$\frac{2,06}{(1+13s)(1+173s)}$	$-\frac{0,232}{1+173s}$	$\frac{0,232}{1+173s}$	$-\frac{0,000282}{s(1+78s)}$	$-\frac{0,025}{(1+3s)(1+30s)^2}$	$-\frac{0,935}{(1+16s)(1+78s)^2}$	$-\frac{0,059}{(1+19s)(1+60s)}$	$-\frac{1,82}{1+264s}$
	$\Delta \theta_{s1}$ °C	$\frac{4,40}{(1+4s)(1+23s)^5}$	$-\frac{2,13}{1+9,15s+50,3s^2}$		$0,045 \frac{1+170s}{(1+45s)^3}$	$\frac{0,132}{(1+7s)^9}$	$-\frac{0,1175}{(1+13s)(1+59s)^2}$		$-1,08 \frac{1+53s}{(1+35s)^2}$
	$\Delta \theta_{s2}$ °C	$1,98 \frac{1+700s}{(1+180s)^4}$	$-\frac{3,32}{(1+26s)(1+78s)^2}$	$-\frac{4,80}{1+25s}$	$\frac{0,122}{(1+20s)(1+140s)}$	$\frac{0,170}{(1+14s)^{5,6}}$	$-\frac{0,155}{(1+160s)^2}$	$\frac{0,262}{(1+96s)^2}$	$-0,375 \frac{1+1350s}{(1+116s)^3}$

 Es gibt keine Kopplung,
  Unmeßbare oder unauswertbare Wirkung,
  $F(s)$ Hauptwirkung,
  $F(s)$ Kopplung

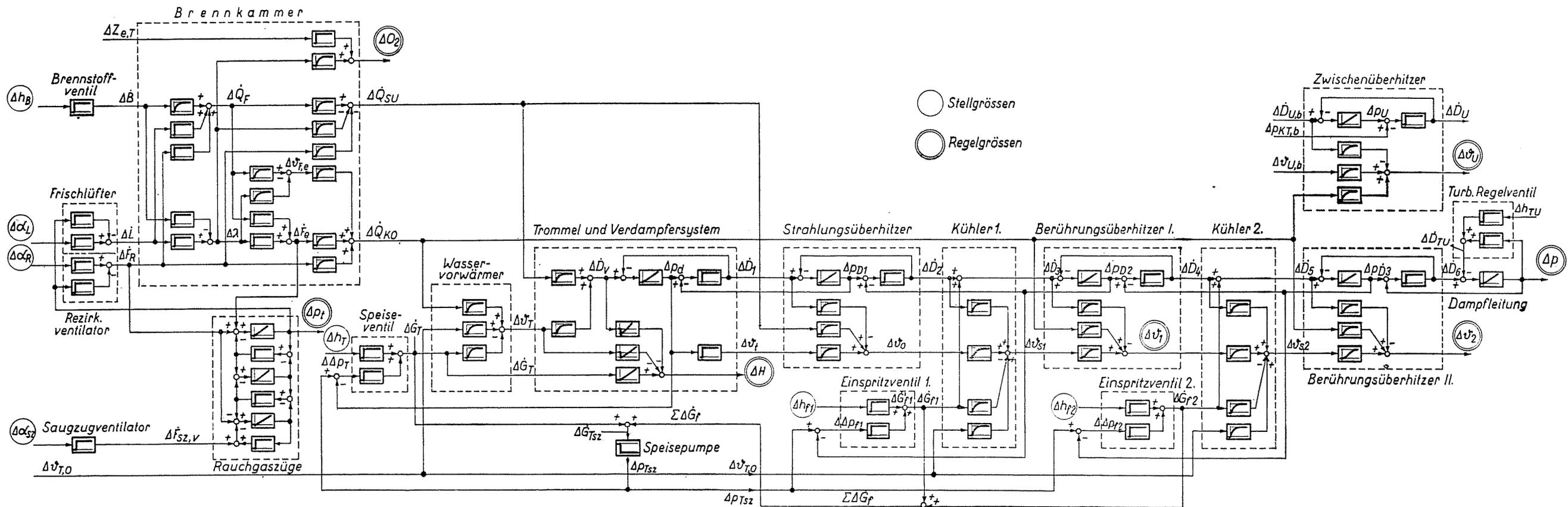


Abb. 1. Axiomatisches Blockschaltbild der Mehrfachstrecke

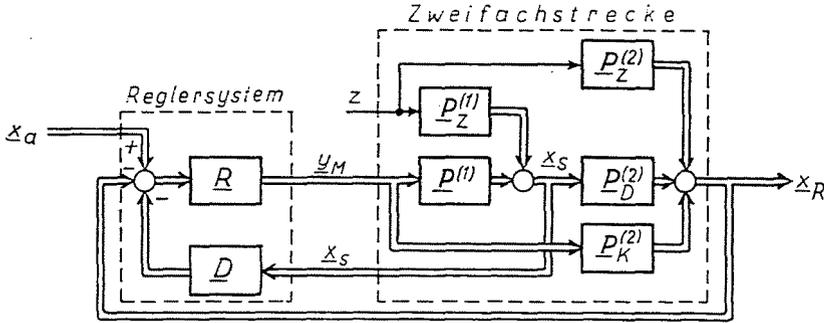


Abb. 3. Matrixblockschaltbild des Zweifachregelsystems

so daß die Übertragungsmatrizen der P -kanonischen Struktur des Systems die folgenden sind:

a) Regelstrecke

$$P^{(1)} = \begin{bmatrix} P_{11}^{(1)} & P_{12}^{(1)} \\ P_{21}^{(1)} & P_{22}^{(1)} \end{bmatrix}; \quad P_D^{(2)} = \begin{bmatrix} P_{11}^{(2)} & 0 \\ 0 & P_{22}^{(2)} \end{bmatrix};$$

$$P_K^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & P_{12}^{(2)} \\ P_{21}^{(2)} & 0 \end{bmatrix}; \quad P_z^{(1)} = \begin{bmatrix} P_{1z}^{(1)} \\ P_{2z}^{(1)} \end{bmatrix}; \quad P_z^{(2)} = \begin{bmatrix} P_{1z}^{(2)} \\ P_{2z}^{(2)} \end{bmatrix};$$

wobei die den einzelnen Matrixelementen entsprechenden Übertragungsfunktionen wie folgt lauten

$$P_{11}^{(1)} = \frac{2,06}{(1 + 13s)(1 + 173s)};$$

$$P_{12}^{(1)} = \frac{0,232}{1 + 168s};$$

$$P_{21}^{(1)} = 0,490 \frac{1 + 1146s}{(1 + 159s)^3};$$

$$P_{22}^{(1)} = -\frac{4,80}{1 + 25s};$$

$$P_{11}^{(2)} = \frac{1,087}{1 + 10s};$$

$$P_{22}^{(2)} = \frac{0,880}{(1 + 11s)(1 + 25s)};$$

$$P_{1z}^{(2)} = 0$$

$$P_{21}^{(2)} = -0,280 \frac{(1 - 132s)(1 + 2200s)}{(1 + 250s)^2(1 + 100s)^2(1 + 30s)};$$

$$P_{1z}^{(1)} = - \frac{1,82}{1 + 264s};$$

$$P_{2z}^{(1)} = 0,036 \frac{1 - 2200 \cdot s}{(1 + 82s)^3};$$

$$P_{1z}^{(2)} = - 0,132 \cdot \frac{1 + 1150s}{(1 + 10s)(1 + 280s)};$$

$$P_{2z}^{(2)} = - 1,125 \frac{360 \cdot s}{(1 + 58s)(1 + 360s)};$$

b) Regler

$$R(s) = \begin{bmatrix} R_{11}(s) & 0 \\ 0 & R_{22}(s) \end{bmatrix}; \quad D(s) = \begin{bmatrix} D_{11}(s) & 0 \\ 0 & D_{22}(s) \end{bmatrix};$$

wo:

$$R_{11}(s) = K_{P11} \left(1 + \frac{1}{T_{I11} \cdot s} \right)$$

$$R_{22}(s) = K_{P22} \left(1 + \frac{1}{T_{I22} \cdot s} \right)$$

$$D_{11}(s) = K_{D11} \cdot \frac{T_{D11} \cdot s}{1 + T_{D11} \cdot s}$$

$$D_{22}(s) = K_{D22} \cdot \frac{T_{D22} \cdot s}{1 + T_{D22} \cdot s}.$$

Das oben gegebene Zweifachsystem wurde auf dem Analogrechner modelliert.

Als Optimierungskriterium wurden die folgenden, in der Praxis allgemein verbreiteten und auch auf einem Analogrechner verhältnismäßig einfach realisierbaren, quadratischen Kostenfunktionale verwendet:

$$a) \quad I_x = \int_{t_0}^{t_v} [\Delta p^2(t) + \Delta \vartheta_2^2(t)] dt$$

$$b) \quad J = \int_{t_0}^{t_v} [\Delta p^2(t) + \Delta \vartheta_2^2(t)] dt + \int_{t_0}^{t_v} [0,2 \{ \Delta \dot{B}^*(t) \}^2 + 0,1 \{ \Delta \dot{G}'_{f_2}^*(t) \}^2] dt$$

wo:

$$\Delta \dot{B}^*(t) = \Delta \dot{B}(t) - \Delta \dot{B}_{STAT}$$

$$\Delta \dot{G}'_{f_2}^*(t) = \Delta \dot{G}'_{f_2}(t) - \Delta \dot{G}'_{f_2 STAT}$$

Von den Funktionswerten der in den Funktionalen berücksichtigten physikalischen Größen wird in Abb 4 ein übersichtliches Bild gegeben. Hier ist ersichtlich, daß das Funktional J über die Kosten der Regelabweichungen

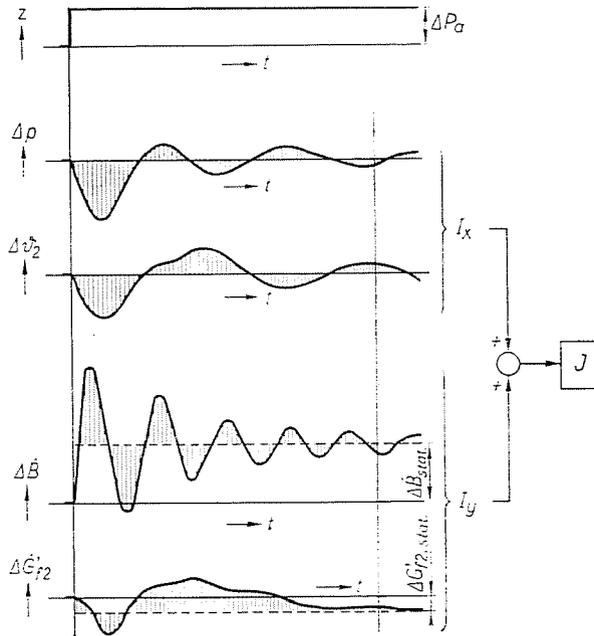


Abb. 4. Die in der Kostenfunktionalen berücksichtigten Funktionswerte

hinaus, auch den gewogenen Preis der Eingriffe enthält. Bei der Wahl der Gewichtungsfaktoren wurde das günstige Übergangsverhalten der Regelgrößen als vorrangig behandelt, da deren Fehler die größten Kostenauswirkungen haben (deshalb ist bei diesen der Gewichtungsfaktor $g = 1$). Da die Regelgrößen zugleich die Frischdampfparameter des Kraftwerkkeisumlaufes sind, beeinflussen sie grundlegend den Wirkungsgrad und letzten Endes dadurch die Energieerzeugungskosten. GleichermäÙe bedeutend sind aber auch die Auswirkungen der absoluten Abweichungen der Kennwerte p und ϑ_2 auf die Lebensdauer der Anlage.

Von den Stellströmen wurden aber — unter Berücksichtigung der benötigten EingriffsenergiegröÙe, der Lebensdauer der Stellglieder und der Einwirkung der Eingriffe auf die Lebensdauer des ganzen Kessels — die Kostenauswirkungen der Veränderungen des Brennstoffstromes $\Delta \dot{B}(t)$ wesentlich gefunden. Hier wurden die Gewichtungsfaktoren $g_1 = 0,20$ und $g_2 = 0,10$ angenommen.

Die Optimierung wurde mittels analoger Simulation durch zyklische Änderung von Regelsystemparametern (K_{P11} , T_{I11} , K_{D11} , T_{D11} , K_{P22} , T_{I22} , K_{D22} , T_{D22}) durchgeführt, nachdem dieses Verfahren verhältnismäÙig einfach und ohne besondere Ausrüstung durchführbar ist. Bei den Untersuchungen gingen wir von den bei dynamischen Messungen im Betrieb erhaltenen Parameterwerten ($k^{\ddot{u}}$) aus, und werteten dann die Systemantworten aus, die sich bei sprungförmigen Leistungsänderungen $\Delta P_a = 1$ MW ergaben. Die Störungs-

übergangsfunktionen, die zur Betriebseinstellung der Regler gehören — mit denen also die Untersuchungen begonnen wurden — sind in Abb. 5 veranschaulicht.

Zum globalen Minimum (Optimum) der Kostenfunktionale gelangten wir über mehrere Zyklen — über Teilminima — wobei die zu I_x und zu J gehörenden optimalen Parametervektoren k^{01} und k^{02} erhalten wurden. Die Parametervektoren sind in Tafel 2 zusammengefaßt.

Das auf k^{01} und das auf k^{02} eingestellte System wurden aufgrund der Extremwerte von I_x und J für optimal befunden. Doch lohnt es sich auch zu untersuchen, wie das Verhalten des Systems bei diesen optimalen Einstellungen ist, wenn darauf eine Leistungstörung ΔP_a wirkt, das heißt, wie das transiente Verhalten der Regelgrößen (Δp , $\Delta \vartheta_2$) und der Stellströme ($\Delta \dot{B}$, $\Delta \dot{G}_{f2}$) in bezug auf die betriebliche Einstellung sein wird. Die durch analoge Simulation aufgenommenen Störungsübergangsfunktionen werden bei k^{01} in Abb. 6, bei der Einstellung k^{02} in Abb. 7 dargestellt. Aus diesen Abbildungen sowie aus dem betrieblich eingestellten Fall (Abb. 5) können auch die in der Praxis wichtigen

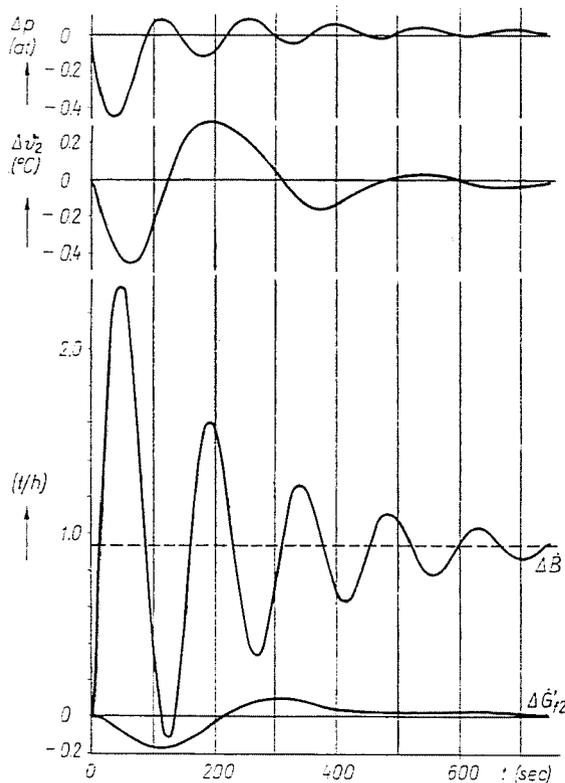


Abb. 5. Störübergangsfunktionen auf $\Delta P_a = 1$ MW des geschlossenen Regelsystems bei k^u -Einstellung

Tafel 2

Die Parameterwerte des Regelsystems im Betrieb und in optimalen Fällen

Parameter	k^{01}	k^{02}	k^{03}
$K_{P11} \left(\frac{t/h}{at} \right)$	1,377	2,80	2,0
$T_{J11} \text{ (sec)}$	11,0	13,0	28,0
$K_{D11} \text{ (at/at)}$	1,782	1,61	3,75
$T_{D11} \text{ (sec)}$	27,0	14,3	15,0
$K_{P22} \left(\frac{t/h}{^{\circ}\text{C}} \right)$	0,0554	0,0550	1,0
$T_{J22} \text{ (sec)}$	7,7	11,0	4,0
$K_{D22} \text{ (}^{\circ}\text{C/}^{\circ}\text{C)}$	0,8379	0,60	0,275
$T_{D22} \text{ (sec)}$	3,0	55,0	30,0

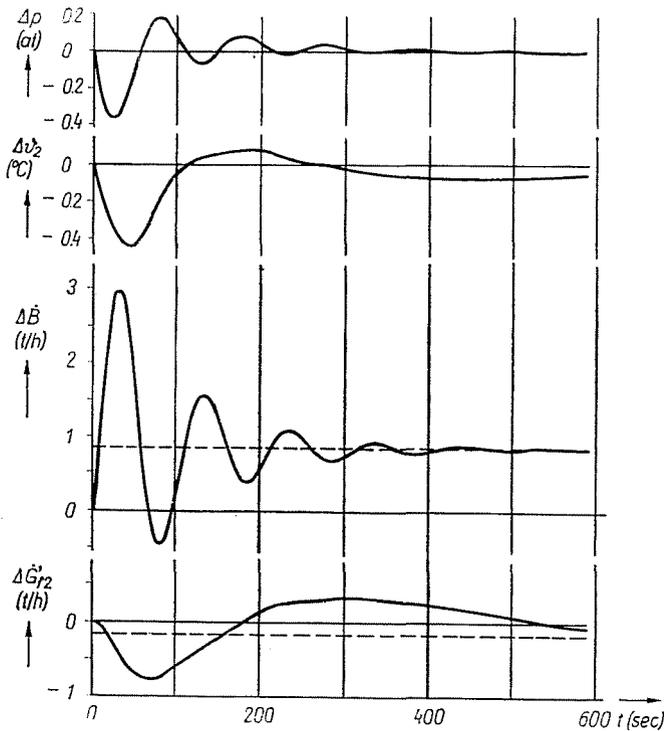


Abb. 6. Störübergangsfunktionen auf $\Delta P_a = 1 \text{ MW}$ des geschlossenen Regelsystems bei k^{01} -Einstellung

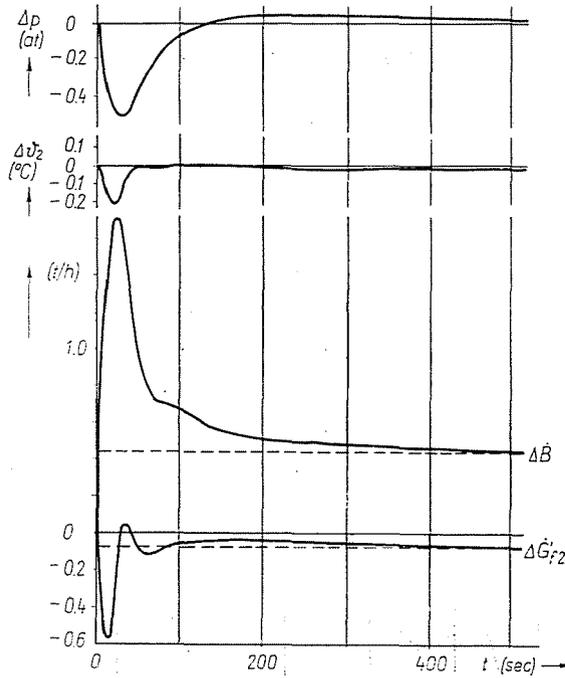


Abb. 7. Störübergangsfunktionen auf $\Delta P_a = 1$ MW des geschlossenen Regelsystems bei k^{02} -Einstellung.

Größen der Regelqualität abgelesen werden, unter denen in unserem Fall die maximalen Abweichungen der Regelgrößen und der Stellströme — in der entsprechenden physikalischen Maßeinheit — sowie die sogenannte Regelzeit (in sec) in Tafel 3 angegeben sind.

Aus dem Charakter der Störungsübergangsfunktionen sowie aus den Daten in Tafel 3 kann eindeutig festgestellt werden, daß sich im allgemeinen

Tafel 3

Die charakteristischen Werte der Übergangsfunktionen bei einer Störung ΔP_a

Übergangsfunktion		Parameter-Einstellung					
		k^{01}		k^{01}		k^{02}	
		max. Abweichung	Regelzeit	max. Abweichung	Regelzeit	max. Abweichung	Regelzeit
Regelgröße	Δp	-0,44	800	-0,37	400	-0,45	200
	$\Delta \theta_2$	-0,46	800	-0,44	700	-0,20	50
Stellstrom	$\Delta \dot{B}$	2,34	950	3,0	500	1,66	450
	$\Delta \dot{G}'_2$	-0,17	450	-0,80	900	-0,58	400

das Übergangsverhalten mit der Parameteroptimierung verbesserte. Die optimale Einstellung k^{02} dem Funktional J entsprechend scheint günstiger zu sein, da sich in diesem Fall das Störverhalten nicht nur bei den Regelgrößen, sondern auch bei den Stellgrößen bedeutend verbessert.

Zusammenfassung

Die an die Energieerzeugung gestellten höheren qualitativen und quantitativen Ansprüche bedingen zugleich wachsende Regelungsprobleme, deren Großteil mit dem Betrieb des Dampfkessels verbunden ist. Deshalb steht die Untersuchung der Kesselregelung auch weiterhin im Vordergrund. Es erwies sich als begründet, den Dampfkessel als Mehrfachsystem zu behandeln, eine Methode, die sich immer mehr verbreitet. Die Arbeit behandelt in diesem Sinne das axiomatische und empirische mathematische Modell eines Kraftwerkkesseles mit Naturumlauf und 500 t/h Dampfleistung sowie die Parameteroptimierung des Zweifachsystems des Dampfkessels.

Literatur

1. CZINDER, J.: Die Optimierung des Regelsystems eines Dampfkessels*, Doktorarbeit. Technische Universität Budapest, Fakultät für Maschinenbau. Budapest, 1976.
2. Graphoanalytische Identifikationsverfahren.* Studie. Technische Universität, Budapest, Lehrstuhl für Wärmekraftwerke, Budapest, 1971.

Dr. Jenő CZINDER, H-1521 Budapest

* In ungarischer Sprache