

BERECHNUNG DER ÜBERTRAGUNGSFUNKTION DES MENSCHEN BEI DER HANDREGELUNG LINEARER SYSTEME MIT MEHREREN REGELGRÖßEN

Von

J. GEDEON

Lehrstuhl für Flugzeugbau, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 24. August, 1964)

Vorgelegt von Prof. Dr. E. RÁCZ

Bei mehrparametrischen Regelkreisen finden sich normalerweise auch Wechselwirkungen zwischen den Regelgrößen, d. h. die Beeinflussung der einen hat auch mehr oder minder große Änderungen der vom Eingriff unmittelbar nicht betroffenen Größen zu Folge. Da viele Mehrparametersysteme mit Handregelung in Gebrauch sind (z. B.: alle Fahrzeuge), ist es nicht gleichgültig, ob sie leicht oder nur mit Mühe gelenkt werden können. Die Vorausberechnung der Lenkbarkeit ist mitunter nur auf Grund ziemlich eingehender dynamischer Analysen möglich. Die hier zu erörternde Berechnungsmethode soll zu einem Teil dieser Analyse werden. Sie bezweckt ferner festzustellen, ob bei der Handregelung einer projektierten Anlage (oder Maschine) Schwierigkeiten zu erwarten sind oder nicht und ob sich im gegebenen Fall nicht etwa die Einstellung eines besonders geeigneten Bedienungsmannes mit großer Erfahrung empfiehlt.

Der Mensch arbeitet als adaptiver Regler. Das hat zur Folge, daß in dem in Matrizenform geschriebenen mathematischen Modell der Systeme mit Handregelung gewisse Koeffizienten der Übertragungsfunktion des Bedienungsmannes zu Funktionen der Eigenschaften des geregelten Systems werden. Die menschliche Anpassungsfähigkeit hat indes ihre Grenzen. Systeme, deren Lenkung eine diese Grenzen überschreitende Anpassungsfähigkeit verlangen, sind als gefährlich zu bezeichnen. Außerdem zeigen die Betriebserfahrungen, daß der Bedienungsmann mit einer Anlage bzw. mit einem Fahrzeug nur dann wirklich zufrieden ist, wenn die Parameterwerte in einem im Verhältnis zum Grenzwert der Anpassungsfähigkeit engen Bereich liegen. Die gefährlichen bzw. die günstigen Parameterkombinationen können anhand der menschlichen Übertragungsfunktion folgendermaßen bestimmt werden:

Nach McRUER [1, 2] läßt sich die menschliche Übertragungsfunktion in der Operatorenform

$$Y_e = K \frac{T_L i\omega + 1}{T_I i\omega + 1} \frac{e^{-i\omega\tau}}{T_N i\omega + 1} \quad (1)$$

aufschreiben, in der die einzelnen Koeffizienten folgende Bedeutung und Werte haben:

Für die Totzeit τ empfiehlt McRUER Werte, die zwischen 0,12 sec und 0,18 sec liegen. Hierbei ist die Verzögerung in den Muskeln nicht mit eingerechnet. Für erfahrene Piloten und bei Reflexbewegungen sind das ohne Zweifel richtige Werte, sonst aber empfiehlt es sich mit mindestens $\tau = 0,4$ sec zu kalkulieren.

T_N ist die Zeitkonstante der Muskelverzögerung. Als Zahlenwert wird 0,1 sec empfohlen.

DECKER rechnet mit einem $\tau = 0,25$ sec und einem $T_N = 0,125$ sec [3].

Der Mensch kann diese Zeitkonstanten an sich selbst nicht willkürlich verändern. Seine Anpassung an das geregelte System erfolgt lediglich durch Einstellung der Verzögerungsgliedes T_I , des Vorhaltgliedes T_L und des Ver-

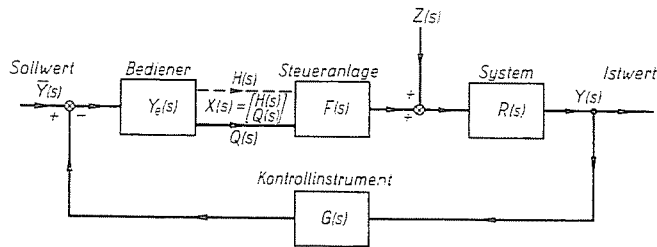


Abb. 1. Blockschema eines von Hand geregelten Systems mit einem Freiheitsgrad

stärkungsfaktors K . T_I kann im Bereich von $0 \div 20$ sec, T_L im Bereich von $0 \div 5$ sec variiert werden, Werte von $T_I > 5$ sec oder $T_L > 0,8$ sec kommen aber schon selten vor. Daten für ihre Vorausberechnung — als Funktionen der Eigenfrequenz und des Dämpfungsgrades des geregelten Systems — sind außer in den schon genannten Arbeiten von McRUER und DECKER auch in der Abhandlung von HALL [4] zu finden.

Das Blockschema eines Regelkreises mit einem Freiheitsgrad ist in Abb. 1 zu sehen. Das zu regelnde System ist hier — weil Einzelheiten bei dieser allgemeinen Behandlung nicht bekannt sind —, in einen einzigen Block zusammengefaßt. Dagegen ist im Hinblick auf die Eigenheit der Aufgabe dem Kontrollinstrument bzw. dem menschlichen Sinnesorgan und der Steueranlage je ein Block zugeordnet. Der Bedienungsmann übt auf das Stueerelement die Kraft Q aus, womit er dessen Verschiebung H , gemessen vom Ruhezustand, verursacht. Der Kraftweg ist mit voll ausgezogenen, die Verschiebung mit gestrichelten Linien dargestellt, womit veranschaulicht werden soll, daß die Regelung hauptsächlich nach dem Kraftgefühl erfolgt, daß also am Steuer ein erfahrener Mann steht.

Das Problem der selbsttätigen Regelung linearer Systeme mit mehreren Regelgrößen wurde nach BOKSENBOM und HOOD [5] ausführlich von TSIEN analysiert [6]. Die Abhandlung von TSIEN befaßt sich mit einem System,

das mehr Stellorte als Regelgrößen hat. Für die Regelung von Hand kann ein analoger Gedankengang angewendet werden, doch ergibt sich ein wesentlicher Unterschied aus der Tatsache, daß wir unsere Aufmerksamkeit nicht unbeschränkt teilen können; gleichzeitig kann höchstens mit der Regelung dreier Größen gerechnet werden. Besitzt das System mehr Freiheitsgrade bzw. Regelgrößen, können die übrigen nur indirekt oder zeitweise beeinflusst werden.

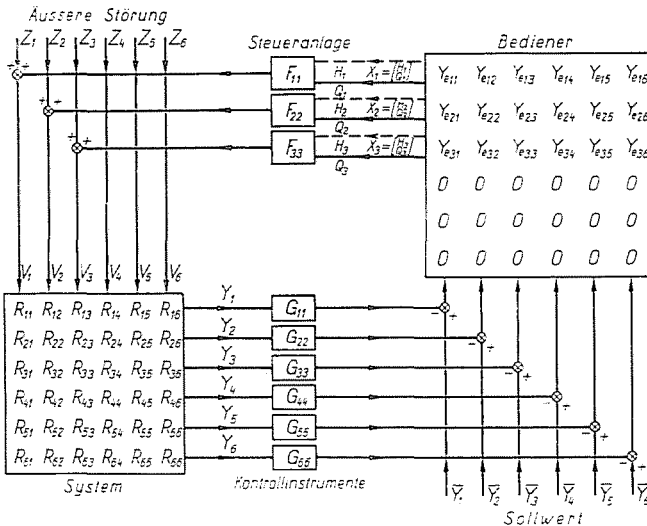


Abb. 2. Blockschema eines von Hand geregelten Systems mit 6 Freiheitsgraden

Für ein System mit beispielsweise sechs Regelgrößen (z. B.: für die Bewegung eines Körpers mit sechs Freiheitsgraden) kann das Blockschema der Regelung gemäß Abb. 2. dargestellt werden. Die Übertragungsfunktion des geregelten Systems ist durch die quadratische Matrix $[R_{ik}]$, die des Bedienungsmannes durch die Operatorenmatrix $[Y_{eik}]$ (wenn und soweit die Handregelung linear ist) beschrieben. Die Übertragungsfunktion der Steueranlage ist durch die Kolumnen-Matrix $[F_{ii}]$, die der Kontrollinstrumente bzw. der Sinnesorgane durch die Kolumnen-Matrix $[G_{ii}]$ gegeben. $[R_{ik}]$, $[F_{ii}]$ und $[G_{ii}]$ seien als bekannt vorausgesetzt, und die Aufgabe besteht darin, $[Y_{eik}]$ zu bestimmen. Aus Gleichung (1) ist leicht einzusehen, daß die Elemente der Matrix des Bedienungsmannes folgende allgemeine Form haben müssen:

$$Y_{eik} = K_{ik} \frac{T_{L_{ik}} i\omega_i + 1}{T_{I_{ik}} i\omega_i + 1} \frac{e^{-i\omega_i \tau}}{T_N i\omega_i + 1} \quad (2)$$

Da die Totzeit τ und die Zeitkonstante der Muskelverzögerung T_N Festwerte sind (nämlich in Rahmen einer gegebenen Aufgabe), sind die Werte von K_{ik} , $T_{L_{ik}}$ und $T_{I_{ik}}$ zu bestimmen.

Ausgehend aus der Voraussetzung, daß der Bedienungsmann gleichzeitig höchstens 3 Regelgrößen beachten kann, folgt, daß

$$\text{für } i > 3 \quad Y_{e_{ik}} = 0.$$

Die Zeilen 4—6 der Matrix des Bedienungsmannes sind also gleich Null. Die Elemente der Hauptdiagonale

$$Y_{e_{ik}} \quad (i = k)$$

können wie bei einem System mit einem Freiheitsgrad einzeln, ohne Berücksichtigung der anderen Regelgrößen berechnet werden; aus der Matrix des geregelten Systems ist das Element R_{ii} in die Rechnung einzusetzen. Insofern wird also die Übertragungsfunktion ebenso berechnet, wie wenn 3 voneinander unabhängige Systeme mit einem Freiheitsgrad zu behandeln wären.

Die übrigen Elemente der Matrix des Bedienungsmannes lassen sich auf Grund der Voraussetzung berechnen, daß ein Eingriff zur Richtigestellung einer Größe alle anderen Größen unbeeinflußt läßt. Die Matrix des nur auf die ausgewählte Größe wirkenden Eingriffes kann nach folgenden Gedankengang entwickelt werden:

Mit der Matrix $[R_{ik}]$ kann man schreiben:

$$Y_i(s) = \sum_{k=1}^6 R_{ik}(s) V_k(s). \tag{3}$$

In Komponenten geschrieben, hat man

$$\begin{aligned} Y_1(s) = & R_{11}(s) V_1(s) + R_{12}(s) V_2(s) + R_{13}(s) V_3(s) + \\ & + R_{14}(s) V_4(s) + R_{15}(s) V_5(s) + R_{16}(s) V_6(s) \end{aligned} \tag{3a}$$

$$\begin{aligned} Y_2(s) = & R_{21}(s) V_1(s) + R_{22}(s) V_2(s) + R_{23}(s) V_3(s) + R_{24}(s) V_4(s) + \\ & + R_{25}(s) V_5(s) + R_{26}(s) V_6(s) \end{aligned} \tag{3b}$$

.....

$$\begin{aligned} Y_6(s) = & R_{61}(s) V_1(s) + R_{62}(s) V_2(s) + R_{63}(s) V_3(s) + \\ & + R_{64}(s) V_4(s) + R_{65}(s) V_5(s) + R_{66}(s) V_6(s). \end{aligned} \tag{3f}$$

Für die Matrix $[Y_{e_{ik}}]$ ist

$$X_i(s) = \sum_{k=1}^6 Y_{e_{ik}}(s) [Y_i(s) - G_{ii}(s) Y_i(s)] \quad (i = 1, 2, 3) \tag{4}$$

$$X_i(s) = 0. \quad (i = 4, 5, 6) \tag{5}$$

In Komponenten geschrieben, ist

$$X_1(s) = Y_{e_{11}}(s) [\bar{Y}_1(s) - G_{11}(s) Y_1(s)] + Y_{e_{12}}(s) [\bar{Y}_2(s) - G_{22}(s) Y_2(s)] + \dots \\ \dots + Y_{e_{16}}(s) [\bar{Y}_6(s) - G_{66}(s) Y_6(s)] \quad (4a)$$

$$X_2(s) = Y_{e_{21}}(s) [\bar{Y}_1(s) - G_{11}(s) Y_1(s)] + Y_{e_{22}}(s) [Y_2(s) - G_{22}(s) Y_2(s)] + \dots \\ \dots + Y_{e_{26}}(s) [\bar{Y}_6(s) - G_{66}(s) Y_6(s)] \quad (4b)$$

$$X_3(s) = Y_{e_{31}}(s) [\bar{Y}_1(s) - G_{11}(s) Y_1(s)] + Y_{e_{32}}(s) [\bar{Y}_2(s) - G_{22}(s) Y_2(s)] + \dots \\ \dots + Y_{e_{36}}(s) [\bar{Y}_6(s) - G_{66}(s) Y_6(s)] \quad (4c)$$

$$X_4(s) = X_5(s) = X_6(s) = 0. \quad (5a)$$

Andererseits ist aber

$$V_k(s) = F_{ii}(s) X_i(s) + Z_k(s) \quad (i = k), \quad (6)$$

oder in Komponentenform

$$V_1(s) = F_{11}(s) X_1(s) + Z_1(s) \quad (6a)$$

$$V_2(s) = F_{22}(s) X_2(s) + Z_2(s) \quad (6b)$$

$$V_3(s) = F_{33}(s) X_3(s) + Z_3(s) \quad (6c)$$

$$V_4(s) = Z_4(s) \quad (6d)$$

$$V_5(s) = Z_5(s) \quad (6e)$$

$$V_6(s) = Z_6(s). \quad (6f)$$

Nach Ordnung der Gleichungen (3)–(6) hat man

$$Y_1(s) = \sum_{r=1}^6 R_{1r}(s) \{ F_{11}(s) Y_{e_{1r}}(s) [\bar{Y}_r(s) - G_{rr}(s) Y_r(s)] + Z_r(s) \} \quad (7a)$$

$$Y_2(s) = \sum_{r=1}^6 R_{2r}(s) \{ F_{22}(s) Y_{e_{2r}}(s) [\bar{Y}_r(s) - G_{rr}(s) Y_r(s)] + Z_r(s) \} \quad (7b)$$

$$Y_3(s) = \sum_{r=1}^6 R_{3r}(s) \{ F_{33}(s) Y_{e_{3r}}(s) [\bar{Y}_r(s) - G_{rr}(s) Y_r(s)] + Z_r(s) \} \quad (7c)$$

$$Y_4(s) = \sum_{r=1}^6 R_{4r}(s) Z_r(s) \quad (7d)$$

$$Y_5(s) = \sum_{r=1}^6 R_{5r}(s) Z_r(s) \quad (7e)$$

$$Y_6(s) = \sum_{r=1}^6 R_{6r}(s) Z_r(s). \quad (7f)$$

Andererseits ist aus Gleichung (4) und (6)

$$V_1(s) = \sum_{v=1}^6 F_{11}(s) Y_{e_{1v}}(s) [\bar{Y}_v(s) - G_{vv}(s) Y_v(s)] + Z_1(s) \quad (8a)$$

$$V_2(s) = \sum_{v=1}^6 F_{22}(s) Y_{e_{2v}}(s) [\bar{Y}_v(s) - G_{vv}(s) Y_v(s)] + Z_2(s) \quad (8b)$$

$$V_3(s) = \sum_{v=1}^6 F_{33}(s) Y_{e_{3v}}(s) [\bar{Y}_v(s) - G_{vv}(s) Y_v(s)] + Z_3(s) \quad (8c)$$

$$V_4(s) = Z_4(s) \quad (8d)$$

$$V_5(s) = Z_5(s) \quad (8e)$$

$$V_6(s) = Z_6(s). \quad (8f)$$

Um die Bedingungen für das Nicht-Eingreifen in die anderen Größen aufschreiben zu können, wird man die Form der Gleichungen zweckmäßig ein wenig ändern. Wird jene Größe, die durch den Regelungseingriff beeinflusst werden soll, mit dem Index g bezeichnet und getrennt geschrieben, wird aus den Gleichungssystemen (7) und (8)

$$\begin{aligned} Y_1(s) = & \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq g}}^6 R_{1v}(s) F_{11}(s) Y_{e_{1v}}(s) \{ \bar{Y}_v(s) - G_{vv}(s) Y_v(s) \} + \\ & + \sum_{v=1}^6 R_{1v}(s) Z_v(s) + R_{1g}(s) F_{11}(s) Y_{e_{1g}}(s) \{ \bar{Y}_g(s) - G_{gg}(s) Y_g(s) \} \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\begin{aligned} Y_2(s) = & \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq g}}^6 R_{2v}(s) F_{22}(s) Y_{e_{2v}}(s) \{ \bar{Y}_v(s) - G_{vv}(s) Y_v(s) \} + \\ & + \sum_{v=1}^6 R_{2v}(s) Z_v(s) + R_{2g}(s) F_{22}(s) Y_{e_{2g}}(s) \{ \bar{Y}_g(s) - G_{gg}(s) Y_g(s) \} \end{aligned} \quad (9b)$$

$$\begin{aligned} Y_3(s) = & \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq g}}^6 R_{3v}(s) F_{33}(s) Y_{e_{3v}}(s) \{ \bar{Y}_v(s) - G_{vv}(s) Y_v(s) \} + \\ & + \sum_{v=1}^6 R_{3v}(s) Z_v(s) + R_{3g}(s) F_{33}(s) Y_{e_{3g}}(s) \{ \bar{Y}_g(s) - G_{gg}(s) Y_g(s) \} \end{aligned} \quad (9c)$$

$$Y_4(s) = \sum_{v=1}^6 R_{4v}(s) Z_v(s) \quad (9d)$$

$$Y_5(s) = \sum_{v=1}^6 R_{5v}(s) Z_v(s) \quad (9e)$$

$$Y_6(s) = \sum_{v=1}^6 R_{6v}(s) Z_v(s) \quad (9f)$$

und analog

$$V_1(s) = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq g}}^6 F_{11}(s) Y_{e_{1r}}(s) \{ \bar{Y}_r(s) - G_{rr}(s) Y_r(s) \} + Z_1(s) + \\ + F_{11}(s) Y_{e_{1g}}(s) \{ \bar{Y}_g(s) - G_{gg}(s) Y_g(s) \} \quad (10a)$$

$$V_2(s) = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq g}}^6 F_{22}(s) Y_{e_{2r}}(s) \{ \bar{Y}_r(s) - G_{rr}(s) Y_r(s) \} + Z_2(s) + \\ + F_{22}(s) Y_{e_{2g}}(s) \{ \bar{Y}_g(s) - G_{gg}(s) Y_g(s) \} \quad (10b)$$

$$V_3(s) = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq 1}}^6 F_{33}(s) Y_{e_{3r}}(s) \{ \bar{Y}_r(s) - G_{rr}(s) Y_r(s) \} + Z_3(s) + \\ + F_{33}(s) Y_{e_{3g}}(s) \{ \bar{Y}_g(s) - G_{gg}(s) Y_g(s) \} \quad (10c)$$

$$V_4(s) = Z_4(s) \quad (10d)$$

$$V_5(s) = Z_5(s) \quad (10e)$$

$$V_6(s) = Z_6(s). \quad (10f)$$

Der Eingriff in eine Größe läßt die anderen Größen unverändert, wenn bei $i \neq g$ die $Y_i(s)$ -Werte von $Y_g(s)$ unabhängig sind, wenn also das letzte Glied in den Gleichungen (9) bei $i \neq g$ verschwindet. Es ist leicht einzusehen, daß diese Forderung folgendermaßen formuliert werden kann:

$$\sum_{k=1}^3 R_{jk}(s) F_{kk}(s) Y_{e_{kj}}(s) = 0 \quad (j \neq g). \quad (11)$$

(Eigentlich wäre die Summierung bis $k = 6$ fortzusetzen, doch ist bei $k > 3$ $Y_{e_{kj}} = 0$, und somit auch das Produkt gleich Null.)

Entwickelt, nimmt die Gleichung (11) folgende Gestalt an:

$g = 1$:

$$R_{21}(s) F_{11}(s) Y_{e_{11}}(s) + R_{22}(s) F_{22}(s) Y_{e_{21}}(s) + R_{23}(s) F_{33}(s) Y_{e_{31}}(s) = 0.$$

$$R_{31}(s) F_{11}(s) Y_{e_{11}}(s) + R_{32}(s) F_{22}(s) Y_{e_{21}}(s) + R_{33}(s) F_{33}(s) Y_{e_{31}}(s) = 0.$$

$g = 2$:

$$R_{11}(s) F_{11}(s) Y_{e_{12}}(s) + R_{12}(s) F_{22}(s) Y_{e_{22}}(s) + R_{13}(s) F_{33}(s) Y_{e_{32}}(s) = 0.$$

$$R_{31}(s) F_{11}(s) Y_{e_{12}}(s) + R_{32}(s) F_{22}(s) Y_{e_{22}}(s) + R_{33}(s) F_{33}(s) Y_{e_{32}}(s) = 0. \quad (11a)$$

$g = 3$:

$$R_{11}(s) F_{11}(s) Y_{e_{13}}(s) + R_{12}(s) F_{22}(s) Y_{e_{23}}(s) + R_{13}(s) F_{33}(s) Y_{e_{33}}(s) = 0.$$

$$R_{21}(s) F_{11}(s) Y_{e_{13}}(s) + R_{22}(s) F_{22}(s) Y_{e_{23}}(s) + R_{23}(s) F_{33}(s) Y_{e_{33}}(s) = 0.$$

Das Gleichungssystem (11a) enthält zwar 6 Unbekannte $Y_{e_{ik}}(s)$ ($i \neq k$), das System kann jedoch in 3 unabhängige Gleichungssysteme mit je 2 Unbekannten zerlegt werden, die sich ohne jede Schwierigkeiten lösen lassen. So ist z. B.

$$Y_{e_{21}}(s) = \frac{\left(\frac{R_{33}(s)}{R_{23}(s)} R_{21}(s) - R_{31}(s) \right) F_{11}(s)}{\left(R_{32}(s) - R_{22}(s) \frac{R_{33}(s)}{R_{23}(s)} \right) F_{22}(s)} Y_{e_{11}}(s) \quad (12)$$

usw.

Kann die so errechnete Übertragungsfunktion in die Form der Gl. (1) gebracht werden und liegen die Werte von $\sum_{k=1}^3 Y_{e_{ik}}(s)$ bei jedem i zwischen den für die einparametrischen System festgelegten Grenzwerten, dann sind bei der Bedienung keine Schwierigkeiten zu erwarten. Eine weitere Bedingung für die leichte Bedienbarkeit besteht darin, daß die nicht in der Hauptdiagonale liegenden Elemente der Matrix $[Y_{e_{ik}}]$ im Verhältnis zum Diagonalelement derselben Zeile klein sein müssen.

Die beiden obigen Bedingungen lassen sich folgendermaßen erläutern und begründen.

Die bei der Handregelung einzuhaltenden Grenzwerte haben offenbar für jede einzelne Regelgröße dieselbe Gültigkeit wie bei Einparametersystemen. Der auf die einzelne Regelgröße wirkende Eingriff aber ergibt sich aus der Summe der Elemente der betreffenden Zeile der Matrix $[Y_{e_{ik}}]$. Das Verhältnis der einzelnen Elemente einer Zeile zueinander ist deshalb wichtig, weil bei den nicht diagonalen Elementen eine Abweichung der einen Größe auch bei den anderen Größen korrigiert werden muß. Lange Zeit hindurch ist das ziemlich anstrengend.

Sind die obige Voraussetzungen nicht erfüllt, muß mit Bedienungsschwierigkeiten gerechnet werden. Es empfiehlt sich daher, durch geeignete konstruktive Änderungen die Verminderung der Elemente R_{ik} ($i \neq k$) der Matrix $[R_{ik}]$ anzustreben.

Die Berechnungsmethode hat keine Auskunft über die Elemente $Y_{e_{ik}}$ ($k > 3$) der Matrix $[Y_{e_{ik}}]$ gegeben. Offenbar bleibt bei $Y_{e_{ik}} = 0$ ($k > 3$) die Grundbedingung, daß gegenseitig keine Beeinflussung erfolgen darf, unverändert bestehen. Das ist also eine mögliche und richtige Lösung.

Auch im praktischen Betrieb läßt sich oft beobachten, daß der Bedienungsmann die unmittelbar beeinflussten Regelgrößen unabhängig von den nicht geregelt zu kontrollieren trachtet. Die Messung oder die vom Bedienungsmann in gewissen Intervallen vorgenommene Kontrolle der nicht unter Regelung stehenden Größen pflegt selten einen Eingriff auszulösen.

Wenn jedoch der Bedienungsmann auf Grund einer solchen Kontrolle einen Eingriff für nötig hält, wird dieser Eingriff wahrscheinlich nicht mehr nach dem Prinzip der gegenseitigen Nicht-Beeinflussung erfolgen. In solchen Fällen wird sich das Vorstellen weitgehend nach den Eigentümlichkeiten des betreffenden Systems richten, eventuell nicht einmal linear sein. Es wäre daher unzumutbar, auch für diese Fälle nach einer allgemeingültigen Lösungsform zu suchen. Im Notfall kann man von den bei der gegebenen Aufgabe wahrscheinlichen Bedingungen ausgehen und mit einer der vorstehenden ähnlichen Rechenmethode zurechtkommen.

Bezeichnungen

e	$= 2,71828 \dots$ Grundzahl des natürlichen Logarithmus
i	$= \sqrt{-1}$ imaginäre Zehleinheit
s	unabhängige Veränderliche der Operatorenfunktion
$F(s)$	Operatorenform der Übertragungsfunktion der Steueranlage
$G(s)$	Operatorenform der Übertragungsfunktion der Kontrollinstrumente
$H(s)$	Operatorenform der Verschiebungsfunktion der Steuerelemente
K	Verstärkungsfaktor
$Q(s)$	Operatorenform der Kraftfunktion an den Steuerelementen
$R(s)$	Operatorenform der Übertragungsfunktion des geregelten Systems
T_I	Zeitkonstante (Verzögerungsglied)
T_L	Zeitkonstante (Vorhalteglied)
T_N	Zeitkonstante der Muskelverzögerung
$V(s)$	Operatorenform der Summe des Regeleingriffes und der äußeren Störung
$X(s)$	Operatorenform des Regeleingriffes
$Y(s)$	Operatorenform von $y(t)$
$\bar{Y}(s)$	Operatorenform des Sollwertes
$Y_c(s)$	Operatorenform der menschlichen Übertragungsfunktion
$Z(s)$	Operatorenform der äußeren Störung
τ	Totzeit
ω	Kreisfrequenz

Zusammenfassung

Die Übertragungsfunktion des Bedienungsmannes bei der Handregelung mehrparametrischer linearer Systeme kann in Matrizenform geschrieben werden. Die Elemente der Hauptdiagonale lassen sich einzeln, ohne Berücksichtigung der Wechselwirkungen, berechnen. Die nicht diagonalen Elemente werden von den Wechselwirkungen bestimmt. Bei der Berechnung dieser Glieder kann angenommen werden, der Bedienungsmann trachte danach, die Folgen der Wechselwirkungen auszugleichen. Es ist auch zu berücksichtigen, daß der Mensch seine Aufmerksamkeit gleichzeitig höchstens drei verschiedenen Vorgängen zuzuwenden vermag, weshalb die Aufgabe auf die Lösung dreier unabhängiger Matrizen-Gleichungssysteme ersten Grades mit je zwei Unbekannten zurückgeführt werden kann.

Literatur

1. WESTBROOK, CH. B.—MCRUER, D. T.: Handling Qualities and Pilot Dynamics. Aerospace Engineering, Mai 1959, S. 26—32.
2. ASHKENAS, I. L.—MCRUER, D. T.: A Theory of Handling Qualities Derived from Pilot-Vehicle System Considerations. Aerospace Engineering, Februar 1962, S. 60—61 und 83—102.

3. DECKER, J. L.: The Human Pilot and the High-Speed Airplane. *Journal of the Aeronautical Sciences*, August 1956, S. 765—770.
4. HALL, I. A. M.: Study of the Human Pilot as a Servo-Element. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, Juni 1963, S. 351—360.
5. BOKSENBOM, A. S.—HOOD, R.: NACA TR 980 (1950).
6. TSIEN, H. S.: *Engineering Cybernetics*. Mc. Graw-Hill Book Company Inc., New-York, 1954.

József GEDEON, Budapest XI., Bertalan Lajos u. 4—6. Ungarn