

EIN VEREINFACHTES VERFAHREN FÜR ADAPTIV-OPTIMALE REGELUNG DER REGELKREISE MIT VERÄNDERLICHEN PARAMETERN

Von

P. MAGYAR

Lehrstuhl für Automatisierung, Technische Universität Budapest
(Eingegangen am 4. Mai 1971)

Vorgelegt von Prof. Dr. F. CSÁKI

1. Einführung

Der Beitrag zeigt ein nach der Gradientenmethode abgeleitetes Verfahren für adaptiv-optimale Regelung der Regelkreise mit Regelstrecken veränderlicher Parameter. Es wird gezeigt, wie das nach dem Gradientenverfahren arbeitende und das vereinfachte System aufgebaut sind. Oszillogramme beweisen die Anwendbarkeit des vereinfachten Systems. Im angeführten Beispiel ist die Regelstrecke ein Gleichstromservomodell, der Optimalisator und der Regler sind auf einem MEDA-Analogrechner abgebildet.

2. Adaptiv-optimale Regelung der Regelkreise nach dem Gradientenverfahren

Die Regler werden meistens nach verschiedenen Gütekriterien eingestellt. Diese Kriterien bezeichnen den Extremwert, im allgemeinen das Minimum eines aus irgendeinem Signal des Regelkreises gebildeten Funktionals. Wenn es erfüllt ist, arbeitet das System in Hinsicht auf dieses Kriterium in optimaler Einstellung. In Kenntnis der Streckenparameter lassen sich die optimalen Reglerparameter nach den aus dem Gütekriterium bestimmten Zusammenhängen errechnen [1]. Wenn sich die Streckenparameter ändern, müssen im Interesse des optimalen Betriebs auch die Reglerparameter dementsprechend — und zweckmäßig automatisiert — geändert werden. Eine mögliche Lösung ist die Anwendung des Gradientenverfahrens.

Im Regelkreis (Bild 2—1) verändern sich die Parameter der Regelstrecke (die Komponenten des Vektors S). Der optimale Betrieb wird so verwirklicht, daß die Reglerparameter (die Komponenten des Vektors C) durch den Optimalisator auf Grund der aus dem System gewonnenen Informationen auf den entsprechenden Wert gestellt werden.

Als Gütekriterium wird das Minimum eines aus der Regelabweichung gebildeten Funktionals gewählt [2]:

$$M\{Q[X, (C, S)]\} = \text{Min} \quad (2.1)$$

Nach der Definition des Gradientenverfahrens läßt sich der Vektor \mathbf{C} der Reglerparameter wie folgt berechnen:

$$\mathbf{C} = -\frac{1}{s} \mathbf{\Gamma} \operatorname{grad}_{\mathbf{C}} Q[X_r(\mathbf{C}, \mathbf{S}, s)] = -\frac{1}{s} \mathbf{\Gamma} \frac{\partial Q}{\partial X_r} \operatorname{grad}_{\mathbf{C}} X_r(\mathbf{C}, \mathbf{S}, s) \quad (2.2)$$

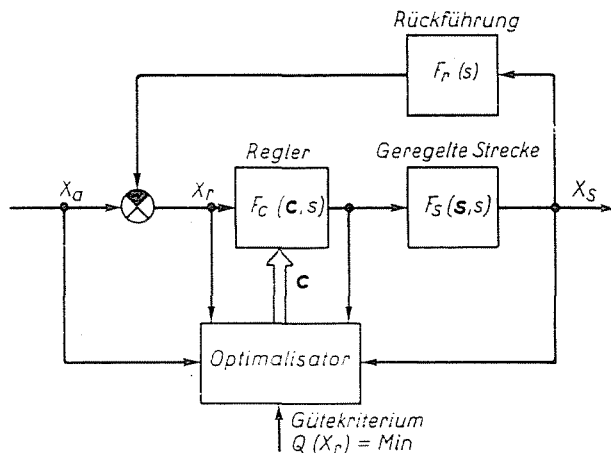


Bild 2-1. Der prinzipielle Aufbau des optimalen Regelkreises

wo \mathbf{C} und \mathbf{S} Spaltenvektoren sind, die die Vektoren der verändernden Parameter des Regelkreises bedeuten;

$\mathbf{\Gamma}$ ist eine Diagonalmatrix, die Matrix der Konvergenzkoeffizienten:
 s ist die Veränderliche der LAPLACESchen Transformation.

Da

$$X_r(\mathbf{C}, \mathbf{S}, s) = X_a(s) \frac{1}{1 + F_c(\mathbf{C}, s) F_s(\mathbf{S}, s) F_r(s)} \quad (2.3)$$

und der Sollwert X_a nicht von \mathbf{C} abhängt, läßt sich

$$\operatorname{grad}_{\mathbf{C}} X_r(\mathbf{C}, \mathbf{S}, s) = \frac{\partial X_r(\mathbf{C}, \mathbf{S}, s)}{\partial \mathbf{C}} = -X_a(s) \frac{1}{1 + F_c(\mathbf{C}, s) F_s(\mathbf{S}, s) F_r(s)} \cdot \frac{F_s(\mathbf{S}, s) F_r(s)}{1 + F_c(\mathbf{C}, s) F_s(\mathbf{S}, s) F_r(s)} \frac{\partial F_c(\mathbf{C}, s)}{\partial \mathbf{C}} \quad (2.4)$$

schreiben. Wird der Zusammenhang 2.4 unter Berücksichtigung von 2.3 in 2.2 eingesetzt, erhält man

$$\mathbf{C} = \frac{1}{s} \mathbf{\Gamma} \frac{\partial Q}{\partial X_r} X_r(\mathbf{C}, \mathbf{S}, s) \frac{F_s(\mathbf{S}, s) F_r(s)}{1 + F_c(\mathbf{C}, s) F_s(\mathbf{S}, s) F_r(s)} \frac{\partial F_c(\mathbf{C}, s)}{\partial \mathbf{C}} \quad (2.5)$$

Auf Grund des erhaltenen Zusammenhanges läßt sich das Blockdiagramm des optimalen Systems aufzeichnen (Bild 2—2). Die Mittelwertbildung wird mit Hilfe des Verzögerungsgliedes mit der Zeitkonstante T_V durchgeführt; der Vektor C_0 enthält die Anfangswerte des Reglerparameters. Ein Beispiel für ein solches System ist in [3] zu finden.

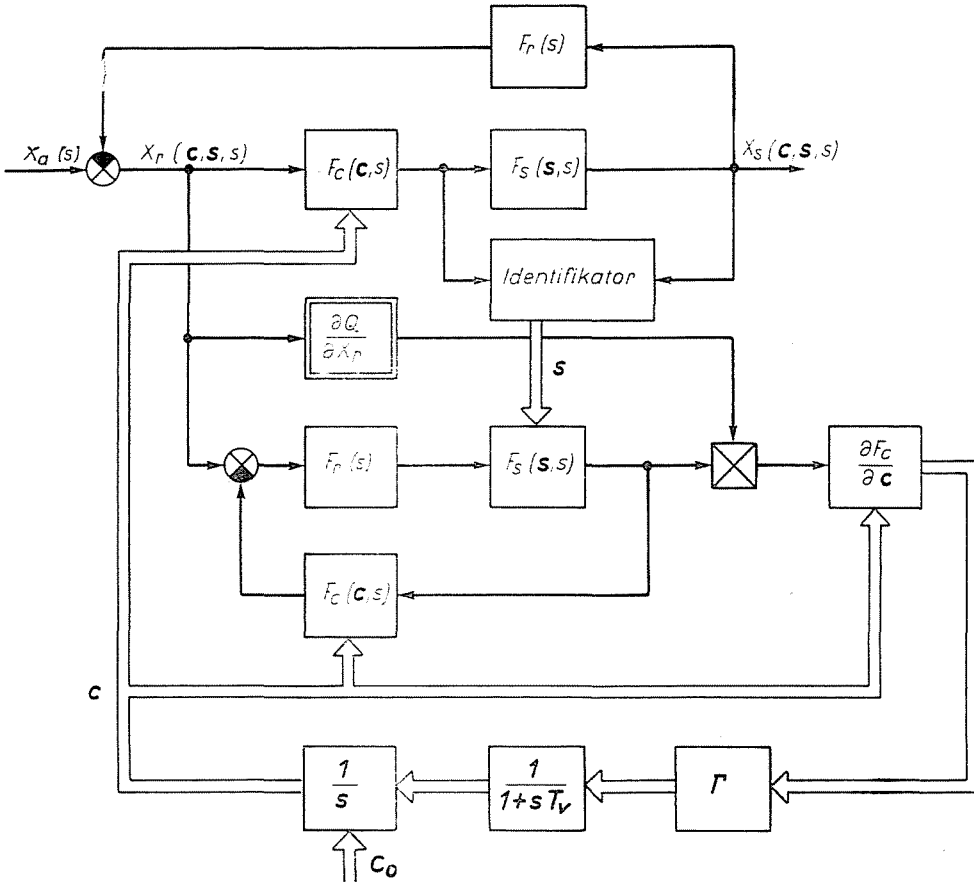


Bild 2—2. Der Aufbau des optimalen Regelkreises nach dem Gradientenverfahren

3. Der Aufbau des vereinfachten optimalen Systems

Die Realisierung des Systems nach Bild 2—2 erfordert einen sehr großen Aufwand. Unter Anwendung eines Analogrechners sind viele Multiplikatoren und Operationsverstärker, beim Einsatz eines Digitalrechners eine große Rechnerkapazität erforderlich. Das System wäre viel einfacher, wenn der Optimisator keine Glieder mit veränderlichen Parametern hätte, da so der Identifikator und viele Multiplikatoren nicht notwendig sind. Diese Möglichkeit wird im folgenden geprüft.

Nach Erreichen des optimalen Zustandes, das heißt, beim Erreichen des Extremwertes des Gütekriteriums, werden sich die Komponenten des Vektors \mathbf{C} nicht mehr ändern. Das zeichnet sich im System in der Form ab, daß die Eingangsgrößen der Integratoren gleich Null sind. In diesem Zustand sind, eben weil zu verschiedenen Streckenparametern verschiedene Reglerparameter gehören, die Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises und die charak-

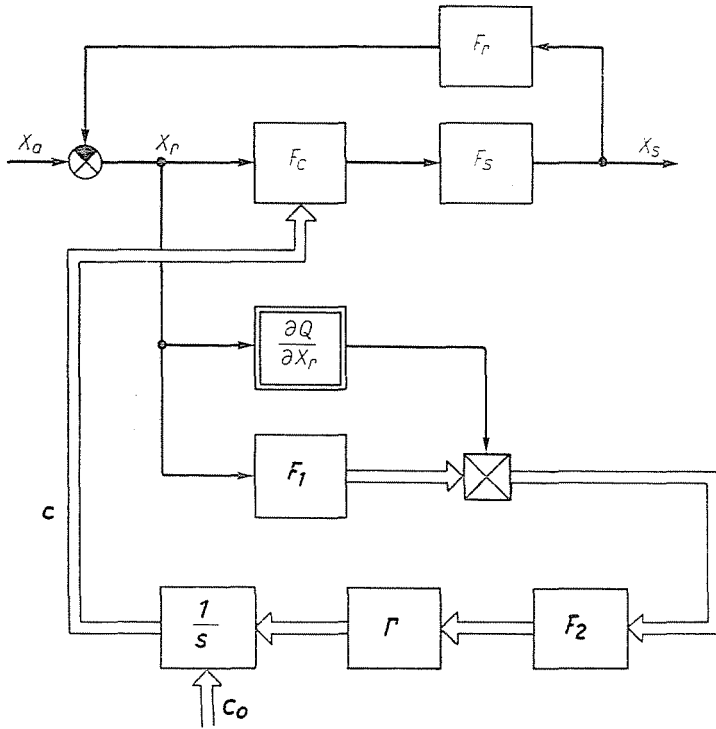


Bild 3-1. Der vereinfachte optimale Regelkreis

teristische Gleichung des Filters

$$\frac{F_s F_r}{1 + F_c F_s F_r}$$

immer dieselben. Wenn also der Filter mit veränderlichen Parametern im Optimisator durch den Filter

$$F_1 = \left. \frac{F_s F_r}{1 + F_c F_s F_r} \right|_{\text{opt}}$$

ersetzt wird, dessen Übertragungsfunktion dem optimalen Zustand entspricht, werden die Eingangssignale der Integratoren gleich Null sein, wenn im System die optimalen Parameter eingestellt sind. Das heißt, der stationäre Zustand

der Parametereinstellung und das Erreichen des Optimums treffen gleichzeitig ein. Da das Glied $\partial F_c / \partial c$ linear ist, hat es keine Wirkung auf den Mittelwert des Signals, sondern nur auf die Stabilität des Kreises. Darum ist seine Ersetzung durch einen Filter F_2 günstig, der neben der Mittelwertbildung eine entsprechende Stabilität sichert.

Es ist offensichtlich, daß wenn ein Filter mit anderer Übertragungsfunktion eingesetzt wird, die Stabilisierung der Parametereinstellung nicht im Optimumpunkt eintritt. Durch Änderung eines geeigneten Parameters des Filters F_1 kann der Wert des Reglerparameters, auf den sich das System selbständig einstellt, d. h., der Sollwert des Parametereinstellkreises, bestimmt werden.

Bild 3—1 zeigt das nach dem oben beschriebenen Prinzip aufgebaute System. Hier tritt eine optimale Regelung auch bei veränderlichen Parametern auf, dieser Regelkreis ist also ein adaptiv-optimales System.

4. Beschreibung des verwirklichten adaptiv-optimalen Systems

In dem Regelkreis, aufgebaut, um den Betrieb des Systems nach Bild 3—1 nachzuweisen, ist das geregelte Objekt ein Gleichstromservomodell; der Regler und der Optimisator werden auf einem Analogrechner MEDA 40 T A—B abgebildet (Bild 4—1).

Die geregelte Strecke, deren Parameter veränderbar sind, besteht aus Servoverstärker und -motor mit Tachometerrückkopplung. Die Übertra-

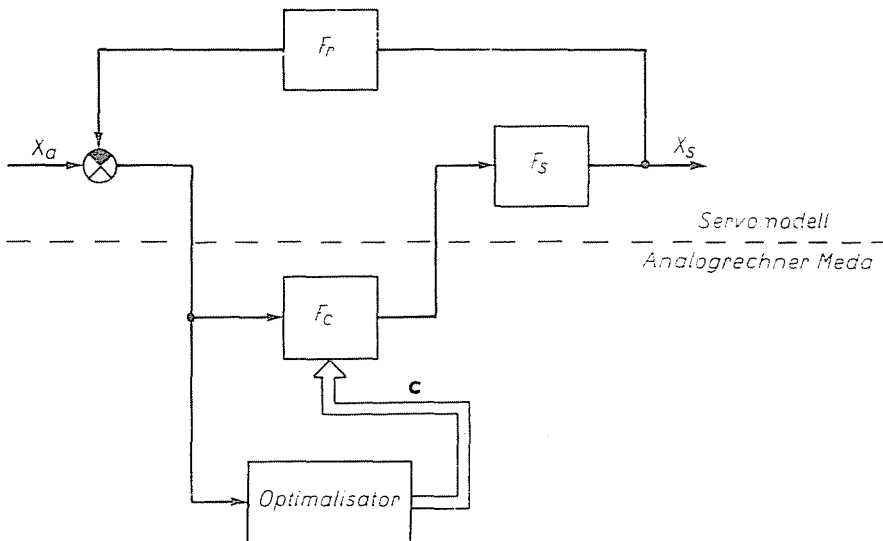


Bild 4—1. Das prinzipielle Schema des verwirklichten optimalen Systems

gungsfunktion ist

$$F_s(\mathbf{S}, s) = \frac{A_s}{s} \frac{1}{1 + sT_s(1 + sT_G)} \quad (4.1)$$

Die sich ändernden Streckenparameter sind in dem Vektor \mathbf{S} zusammengefaßt

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} A_s \\ T_s \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Als Regler wurde ein PD-Glied verwendet:

$$F_c(\mathbf{C}, s) = A_P \frac{1 + sT_D}{1 + sT} \quad (4.3)$$

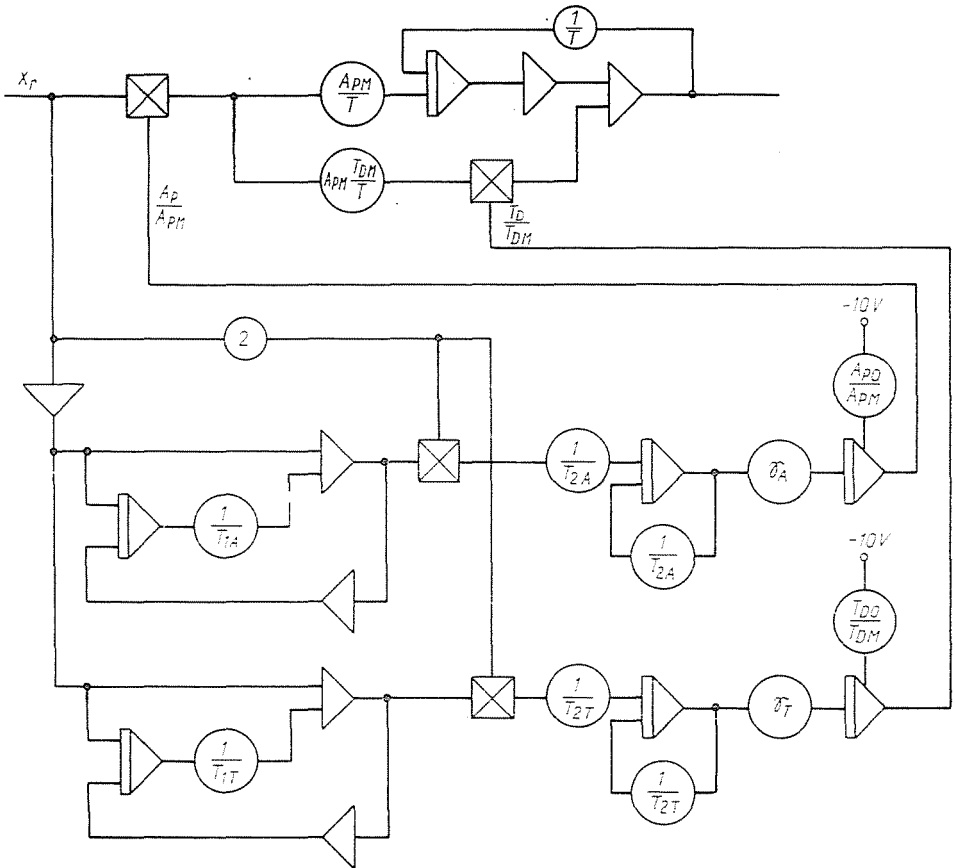


Bild 4-2. Das Rechenprogramm des Reglers und des Optimisators

Der Vektor C enthält die durch den Optimisator eingestellten Reglerparameter

$$C = \begin{bmatrix} A_P \\ T_D/T \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Bild 4—2 zeigt das dimensionierte Programm des Reglers und des Optimisators. Hier bedeuten A_{PM} und T_{DM} die Maximalwerte des Übertragungskoeffizienten und der Differenzierungszeit des Reglers. Der Optimisator

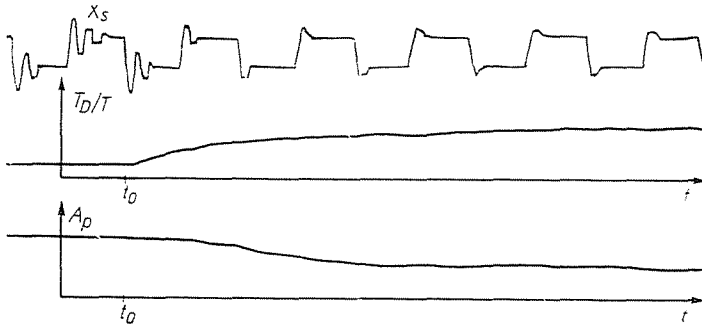


Bild 4—3. Parametereinstellung von dem Anfangszustand $T_D/T = 1$, $A_P/A_{PM} = 1$ in das Optimum ($T_D/T = 4$, $A_P/A_{PM} = 0,5$)

enthält Phasenschiebungsglieder und Verzögerungsglieder, ihre Übertragungsfunktion läßt sich also in der Form

$$F_1 = \begin{bmatrix} \frac{1 - sT_{1A}}{1 + sT_{1A}} \\ \frac{1 - sT_{1T}}{1 + sT_{1T}} \end{bmatrix}; \quad F_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{1 + sT_{2A}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{1 + sT_{2T}} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

schreiben. Im gegebenen Falle ist

$$Q = X_r^2, \quad \frac{\partial Q}{\partial X_r} = 2X_r, \quad (4.6)$$

aber in bezug auf die Realisierung ist auch das Absolutwertkriterium gut anwendbar; dann ist

$$Q = |X_r|, \quad \text{so} \quad \frac{\partial Q}{\partial X_r} = \text{sgn } X_r \quad (4.7)$$

Das System ist so eingestellt, daß sich A_P bei Veränderung von A_s so ändert, daß der resultierende Übertragungskoeffizient konstant bleibt, obgleich bei Änderung von T_s der Frequenzgang durch die Kompensierung zurückgestellt wird (T_D/T ändert sich, $T = \text{const}$). Diese Arbeitsweise des Systems zeigen die Oszillogramme in Bild 4—3, 4—4, 4—5 und 4—6. Diese

Bilder enthalten die Zeitfunktionen der Regelgröße (X_s) und der Reglerparameter ($A_p, T_D/T$) bei einer rechteckförmigen Führungsgröße (X_a). Im Zeitpunkt t_0 erfolgt die Einschaltung des Optimalisators bzw., in den letzten drei Fällen, die sprunghafte Veränderung eines Streckenparameters.

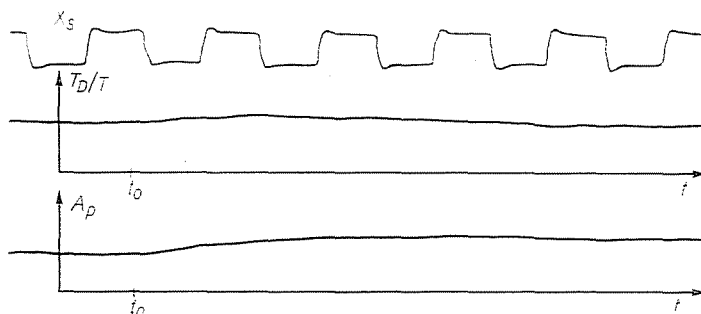


Bild 4-4. Die Arbeitsweise des Systems bei einer 50%igen Verminderung von A_s : A_p erhöht sich auf den doppelten Wert

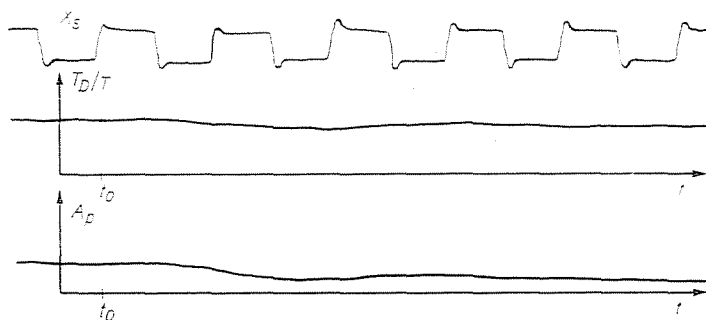


Bild 4-5. Die Arbeitsweise des Systems bei einer 100%igen Vergrößerung von A_s : A_p sinkt auf den halben Wert

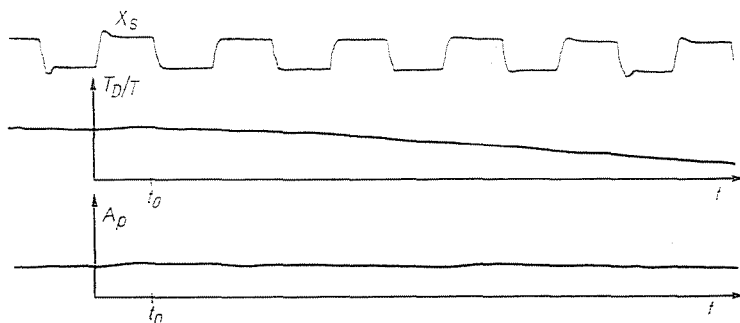


Bild 4-6. Die Arbeitsweise des Systems, wenn T_s auf ein Drittel sinkt: T_D/T sinkt von 4 auf 1

Zusammenfassung

Im Beitrag wird ein Verfahren behandelt, nach dem ein adaptiv-optimales Regelsystem verwirklicht werden kann. Der Regelkreis und der Parametereinstellkreis arbeiten stabil, wenn die Streckenparameteränderung nicht zu groß ist. Das System erfordert einen geringeren Aufwand, als unter Anwendung des Gradientenverfahrens.

Literatur

1. CSÁKI, F.: Szabályozások dinamikája. Lineáris szabályozáselmélet. Akadémiai Kiadó, Budapest 1966.
2. CSÁKI, F.: Korszerű szabályozáselmélet. Nemlineáris optimális és adaptív rendszerek. Akadémiai Kiadó, Budapest 1970.
3. RAKE, H.: Selbsteinstellende Systeme nach dem Gradientenverfahren. Regelungstechnik **15**, 211–217 (1967).

Péter MAGYAR, Budapest XI., Garami E. tér 3., Ungarn