

DIE UNTERSUCHUNG EINIGER ELEKTRISCHER PROBLEME DES HÜTTENWESENS AN ANALOGIE-MODELLEN*

Von

F. CSÁKI

Lehrstuhl für Automation, Technische Universität,
Budapest

(Eingegangen am 28. August 1963)

1. Die Bedeutung der Modellierung

Zufolge der raschen und weitgehenden Entwicklung der Technik haben der Forschungsingenieur, der Entwurfsbearbeiter, der Konstrukteur und auch der Betriebsingenieur immer kompliziertere Aufgaben zu lösen. Hierzu ist einerseits eine möglichst fundierte Kenntnis der physikalischen Erscheinungen und Vorgänge nötig, andererseits muß der Ingenieur im Laufe seiner schaffenden Tätigkeit die Möglichkeit der Erprobung zahlreicher Alternativen besitzen. In der physikalischen Erkenntnis (in der Analyse) als auch beim Projektieren und bei der Konstruktion (in der Synthese) bieten die Modelle recht viele Hilfe.

Im allgemeinen bedarf es eines Modellversuchs, wenn

1. das System (die Einrichtung, das Gerät, die Maschine) in Wirklichkeit so *kompliziert* ist, daß zur Erklärung der Zusammenhänge Vereinfachungen nötig sind;

2. wenn das tatsächliche System wegen seiner *Placierung*, wegen seines *Umfanges* oder zufolge seiner Leistung zum Experimentieren ungeeignet ist;

3. wenn im reellen System aus Gründen der *Betriebsicherheit* oder *Betriebsstetigkeit* keine Messungen durchführbar sind;

4. wenn das tatsächliche System sich erst im *Zustande der Planung* befindet und die Erprobung einiger Alternativen nötig ist;

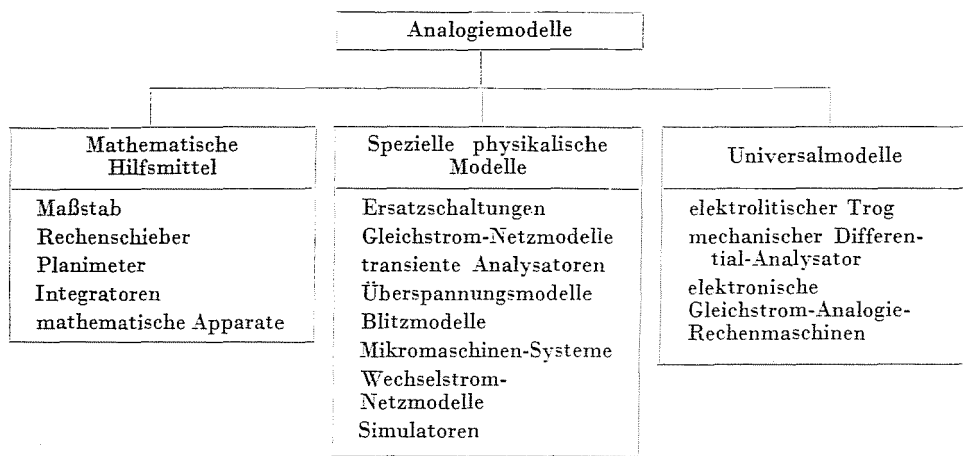
5. wenn die Prozesse mit *mathematischen Rechnungen* überhaupt nicht, oder kaum zu verfolgen sind.

Neuerdings gewannen die diskret funktionierenden digitalen Rechenmaschinen an ausgedehnter Verbreitung und wurden in der Arbeit des Ingenieurs zum effektvollen Hilfsmittel von großer Genauigkeit. Trotzdem verlieren die kontinuierlich funktionierenden Analogiemodelle nicht an Bedeutung. Die kleinere Genauigkeit wird nämlich durch größere Flexibilität, Schmiegsamkeit und durch das zumeist schneller erreichbare Resultat ausgeglichen [1]. Es ist nebenbei zu bemerken, daß die Digital- und Analogiemodelle zur Untersuchung von bestimmten Problemen *nebeneinander* oder *nacheinander* gebraucht werden können.

* Vortrag gehalten gelegentlich der wissenschaftlichen Tagung (3–7. Mai 1963) an der Berg- und Hüttenakademie zu Krakkau.

2. Übersicht der in der Elektrotechnik gebrauchten Modelle

Es würde uns ganz weit führen, wenn wir die auf sämtlichen Gebieten der Technik angewendeten Modelle zu untersuchen die Absicht hätten. Darum beschäftigen wir uns nur mit den in der Elektrotechnik gebrauchten Analogiemodellen, ohne aber nach Vollständigkeit zu streben. Diese können — etwas eigenmächtig — wie folgt gruppiert werden:



Mit den mathematischen Hilfsmitteln wollen wir uns hier nicht einzeln befassen. Unter den speziellen physikalischen Modellen wollen wir uns zunächst mit solchen beschäftigen, welche in der Elektrotechnik der Metallurgie von Bedeutung sind. Von den gut bekannten Ersatzschaltungen ist nicht viel zu sagen, diese sind hauptsächlich zur Untersuchung von elektrischen Maschinen oder elektronischen Schaltungen geeignet. In vielen Fällen werden diese gar nicht aufgebaut, sondern zwecks Vollführung von Gedanken-Experimenten als didaktische oder als mnemotechnische Hilfsmittel angewendet. Die Netzmodelle sind spezielle Sorten der Ersatzschaltungen. Das Wechselstrom-Netzmodell ist zur Untersuchung von verwickelten elektrischen Systemen besonders geeignet. Mit seiner Hilfe können z. B. Kurzschlußströme, Wirkleistungs- und Blindleistungs-Verteilungen, die statische und dynamische Stabilität der in Verband arbeitenden Synchronmaschinen und ähnliche Probleme untersucht werden.

Als Beispiel seiner Anwendung erwähne ich hier ein Problem eines großen ungarischen Hüttenwerkes. Hier wurde ein Synchron-Walz-Zugmotor von 10 MVA (8,5 MW) Leistung aufgestellt. Mit Hilfe des Wechselstrom-Netzmodells wurden während der Planung ausgedehnte Messungen durchgeführt, es wurde untersucht, wie die vom Walzen herstammenden Leistungs- bzw.

Momentstöße auf das Überlandnetz und auf die Generatoren des benachbarten Kraftwerkes übertragen werden [2].

Der transiente Analysator kann zur Untersuchung der Schaltungsüberspannungen, weiterhin zum Studium der wiederkehrenden Spannung vorteilhaft angebracht werden. In letzter Zeit steht das Unterbrechen von Abstands-Kurzschlüssen, welche nach kurzen Fernleitungsstrecken entstehen, im Mittelpunkt des Interesses [3].

Mit Hilfe des Überspannungsmodells und eines Niederspannungs-Stoßgenerators kann der Überspannungsschutz von Unterstationen geprüft werden. In der letzten Zeit wurde in Ungarn die gründliche Untersuchung der Wirkung von Kabelanschlüssen vorgenommen [4].

Mit den Blitzmodellen und mit Hilfe des Hochspannungs-Stoßgenerators kann der optimale Blitzschutz von Gebäuden und Fernleitungen bestimmt werden.

Wegen der relativ hohen Kosten hat man bei uns keine Mikromaschinen-Systeme gebaut, solche wurden zur dynamischen Stabilitätsprüfung besonders in der Sowjetunion und in Frankreich angebracht.

Die speziellen Analogie-Rechenmaschinen-Modelle, die sogenannten Simulatoren werden im Auslande weitgehend zu Lenkungszwecken angewendet, so zum Beispiel bei der Kesselfeuerungsregelung (oder zu Flug- und Navigationszwecken), unter anderem auch zum Einüben des Personals.

Von den universellen Modellen erwähnen wir zuerst den elektrolitischen Trog. Dieser ist zur Prüfung kontinuierlicher Felder, — z. B. elektrostatischer, elektromagnetischer oder Strömungsfelder — zu gebrauchen. Als praktische Anwendung können die elektrischen Maschinen und Apparate erwähnt werden, man kann sie aber auch bei Lichtbogenöfen oder bei Wärmeausbreitungsproblemen anwenden. Ein spezielles Beispiel der Anwendung finden wir beim Untersuchen der Erdungssysteme von Unterstationen. Seit kurzem wird die Elektrolytflüssigkeit durch Metallpapier ersetzt. Damit hat man im Ausland zur Aufnahme der für die Regelungstechnik wichtigen Wurzelorte Analogierechenmaschinen mit speziellem Ziel ausgestaltet. Diesbezüglich wurden auch in Ungarn Experimente angebahnt.

Am meisten können die mechanischen und elektronischen Differential-Analysatoren angewendet werden, besonders zur Lösung von Problemen, welche in der Form von Differentialgleichungen aufgeschrieben werden können. Ihr größter Vorteil ist, daß neben linearen Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten auch Differentialgleichungen mit variablen Koeffizienten und die nichtlinearen Differentialgleichungen — welche dem Ingenieur die schwersten Aufgaben stellen —, gelöst werden. Neben ordentlichen Differentialgleichungen sind auch partielle Differentialgleichungen lösbar.

Mechanische Differential-Analysatoren gibt es in Ungarn nicht, dagegen werden elektronische Analogierechenmaschinen immer mehr angewendet. Zurzeit besitzt der größte von ihnen 30 Verstärker.

3. Einige mittels Analogierechenmaschinen untersuchte Probleme

Zunächst wollen wir uns etwas eingehender mit den elektronischen Analogierechenmaschinen befassen. Das Arbeitsprinzip des Analogrechners ist als bekannt angenommen [5...8]. Im weiteren werden Modellierungsbeispiele aus dem Gebiete der elektrischen Antriebe gezeigt, und zwar jene, die auch in der Elektrotechnik der Metallurgie Bedeutung haben können.

Natürlich kann man mit der Analogierechenmaschine auch zahlreiche andere Probleme lösen, im Rahmen dieses Artikels können wir sie aber nicht alle erwähnen.

3.1. Grobanlauf des fremderregten Gleichstrommotors

Die vereinfachten Grundgleichungen des fremderregten Gleichstrommotors (unter Vernachlässigung der Dämpfung und der Ankerreaktion) [9] schreibt sich zu

$$U_k = R_A i + L_A \frac{di}{dt} + K_E \omega,$$

$$M_d = K_M i - \Theta \frac{d\omega}{dt}.$$

Auf Grund dieser Differentialgleichungen kann die Schaltung des Analogrechners direkt durchgeführt werden, wie dies aus Abb. 1 hervorgeht. Die Summatoren werden durch je ein einfaches Dreieck, die Integratoren durch je ein Dreieck mit doppelter Grundlinie und die Potentiometer, welche die Proportionalitätsfaktoren verwirklichen, werden mit einem Kreis symbolisiert. Dabei ist zu bemerken, daß in den meisten Fällen eine gewisse Modifizierung der Prinzipschaltung nötig ist, weil mit den Potentiometern nur kleinere Koeffizientenwerte als die Einheit eingestellt werden können, und außerdem ergeben sich einige Rechenmaschinenspannungen, die gewisse Größen des untersuchten Motors repräsentieren, entweder zu klein, oder zu groß. Diese Schwierigkeit kann man durch Veränderung des Maßstabes einiger Quantitäten oder durch Modifizierung der Zeitskala auflösen. Hierüber wollen wir aber jetzt nicht sprechen.

Zur Demonstration der Brauchbarkeit der Analogienachbildung und der Analogiemodelle wollen wir hier lieber die Aufmerksamkeit auf zwei Kunstschaltungen lenken. Die im oberen Teil der Abb. 1 gezeigte Schaltung gibt das Integral des absoluten Wertes der gegenüber der stationären Winkelgeschwindigkeit auftretenden Winkelgeschwindigkeitsabweichung, welches für den Anlaufprozeß weitgehend charakteristisch ist. Ähnliche Regelungsflächen finden in der Regelungstechnik vielfach Anwendung.

Das Signal $\omega_\infty - \omega$, welches am Ausgangspunkt des ersten Summators entsteht, wollen wir einerseits direkt auf den Integrator und andererseits durch die Diode und den Vorzeichenumwandler wieder auf den Integrator schalten. Ist die Differenz $\omega_\infty - \omega$ positiv, läßt die Diode durch. Es wirken beim Eingang des Integrators zwei negative Signale und ein positives, insgesamt wirkt daher ein negatives Signal. Falls die Differenz $\omega_\infty - \omega$ negativ ist, schließt die Diode ab, wobei auf den Eingang des Integrators nur ein negatives Signal fällt. Der Integrator bildet auf diese Weise wirklich den gewünschten Absolutwert des Integrals.

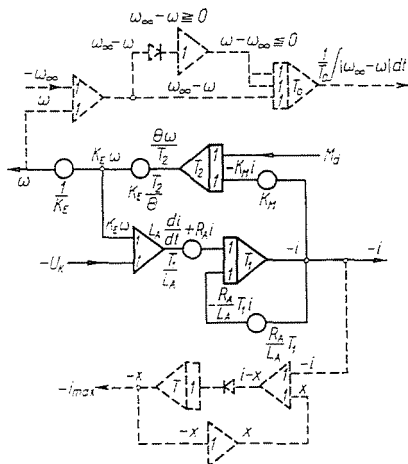


Abb. 1

Die im unteren Teil der Abb. 1 dargestellte Kunstschaltung dient zur Herstellung der Stromspitze, welche dann etwa mit Hilfe eines digitalen Voltmeters direkt zu messen ist.

Abgesehen von der Diode, ist die Differentialgleichung der Schaltung

$$i - x = T \frac{dx}{dt}.$$

An den Eingang des Integrators wird nämlich das Signal

$$i - x = T \frac{dx}{dt}$$

geschaltet, woraus der Integrator das Signal $-x$ herstellt.

Das Signal x , entsprechend der Zeitkonstante T , läuft dem Eingangssignal i nach. Die Diode läßt nur durch, solange i größer ist als x .

Falls der Strom i nach dem erreichten Maximum sich zu vermindern beginnt, wird er bald kleiner als das von ihm kaum abweichende Signal x und

die Diode schließt ab. Von da an bleibt der Wert von $-x$ unverändert und gibt annähernd den Wert von $-i_{\max}$.

Abb. 2/a zeigt den Stromverlauf, wie er mittels der Analogiemaschine aufgenommen wurde. Es sind folgende Fälle angeführt: 1. das Gegendrehmoment ist null oder konstant, 2. das Moment ändert sich mit der Winkelgeschwindigkeit linear, 3. das Moment ändert sich mit dem Quadrat der

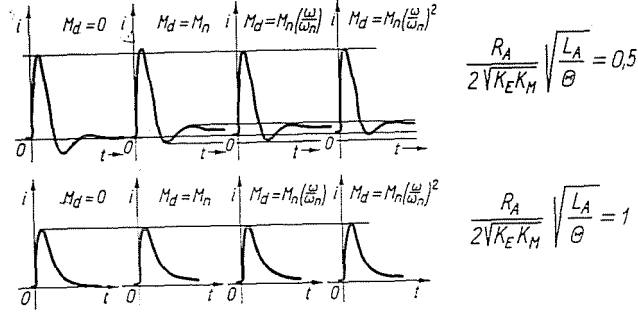


Abb. 2a

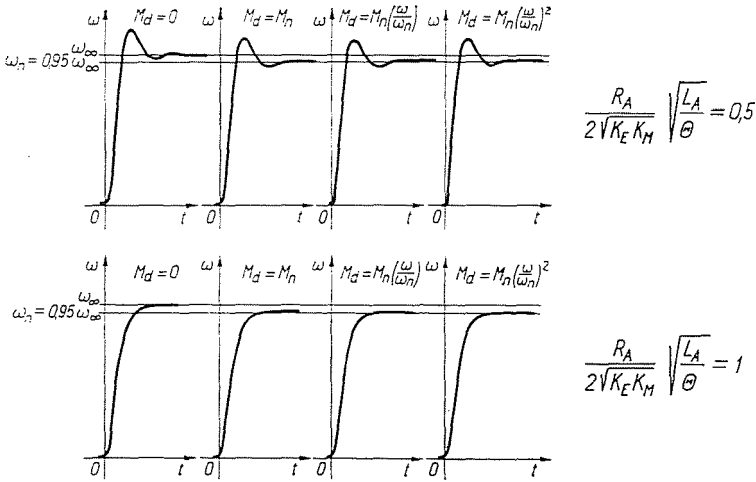


Abb. 2b

Drehzahl. Die Aufnahmen sind für die Werte

$$\frac{R_A}{2 \sqrt{K_M K_E}} \sqrt{\frac{L_A}{\Theta}} = 0,5 \text{ bzw. } = 1$$

aufgetragen.

Ähnlich zeigt Abb. 2/b den zeitabhängigen Ablauf der Winkelgeschwindigkeit für dieselben Fälle.

3.2. Modellierung einer Drehzahlregelung

In den elektrischen Antrieben im allgemeinen, besonders aber in der Elektrotechnik der Metallurgie spielen die Ward-Leonard-Drehzahlregelungen eine besonders wichtige Rolle. Abb. 3 zeigt ein solches System. Es ist zu bemerken, daß der Einfachheit halber die gewöhnliche, vom Drehmoment abhängige Störgrößenaufschaltung (Stromrückkoppelung) hier weggelassen wurde.

Die Erregung des Generators *G* wird durch die Amplydine *A* erzeugt, welche ihrerseits durch den elektronischen Verstärker *V* erregt wird. Wir

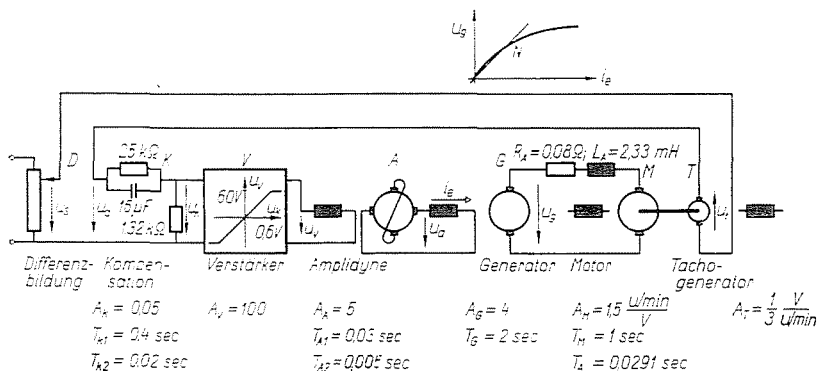


Abb. 3

vermuten, daß der Verstärker beim Erreichen des Dreifachen seiner Nennspannung gesättigt, d. h. begrenzt wird.

Die Drehzahl des Motors *M* wurde mit dem Tachometer-Generator *T* in Form einer Gleichspannung gemessen und mit der vom Potentiometer *P* eingestellten Spannung verglichen. Zur Sicherung der Stabilität des Systems müssen wir ein — aus Widerständen und Kapazität aufgebautes — Kompensationsorgan *K* in den geschlossenen Regelungskreis einsetzen.

Das in der Regelungstechnik übliche Blockschema dieses Systems zeigt Abb. 4. Wenn wir von einer Generator- bzw. Motorleistung von etwa 120 kW ausgehen, kann die Zeitkonstante des Erregungskreises des Generators mit $T_G = 2 \text{ sec}$, die Zeitkonstante des Motors im Ankerkreis mit $T_A = 0,0291 \text{ sec}$, die elektromechanische Zeitkonstante des Motors mit $T_M = 1 \text{ sec}$ usw. angenommen werden. In demselben Blockschema haben wir die stationären Werte der auf Abb. 3 angeführten Größen (Spannungen, Ankerstrom und Drehzahl) für zwei Fälle eingetragen. Die oben sichtbaren Zahlen entsprechen dem Leerlaufzustand, falls kein Belastungsmoment vorhanden ist. Die unteren Zahlen entsprechen dem Nennbelastungszustand, wenn das Moment eben den Nennwert, d. h. 195 mkp aufnimmt. In diesem Falle entsteht ein Belastungsstrom von 300 A. Ohne Drehzahlregelung würde in stationärem Zustand

eine Drehzahlverminderung von 36 U/min entstehen. Wegen der mit einem Verstärkungsfaktor 50 arbeitenden Drehzahlregelung entsteht in der Tat nur deren im Verhältnis von 1 : 51 verminderter Wert, d. h. die Drehzahlverminderung beträgt nur 0,71 U/min. Die innere Spannung des Generators u_g wächst nämlich inzwischen von 400 V auf ungefähr 424 V.

Im ersten Beispiel haben wir die Modellierung mittels Differentialgleichungen durchgeführt. Jetzt wollen wir eine andere Möglichkeit zeigen, wie die Modellierung mit Hilfe der in der Regelungstechnik angewendeten Übertragungsfunktionen zu verwirklichen ist.

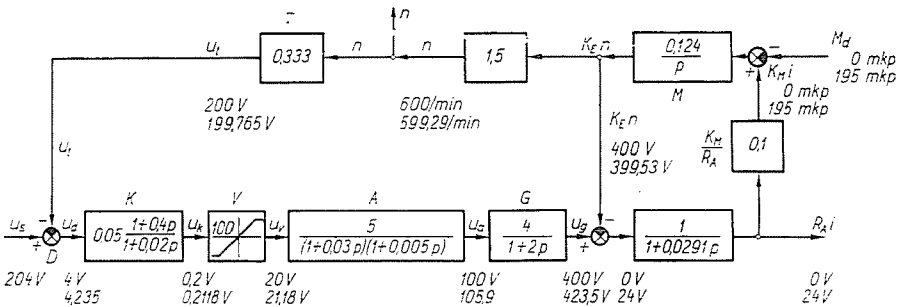


Abb. 4

Abb. 5. zeigt die Modellierung einiger Übergangsfunktionen einfacherer Form, z. B.

$$K \frac{1}{1 + pT_1} ; \quad K \frac{1 + pT_1}{1 + pT_2} ; \quad K \frac{pT_2}{1 + pT_1} ; \quad T_1 > T_2 .$$

Beim Aufschreiben der Zusammenhänge wird das Integrieren durch den Integrationsoperator $1/pT$ symbolisiert. Beim Aufschreiben des zweiten und dritten Zusammenhanges haben wir das Resultat des ersten bereits in Betracht gezogen.

Mit Hilfe der Modell-Elemente der Abb. 5 kann das Blockschema der Abb. 4 leicht zur Anlogschaltung umgesetzt werden (Abb. 6). Um den Vergleich zu erleichtern, haben wir die einzelnen Regelungsorgane auf Abb. 4 und Abb. 6 mit den gleichen Buchstaben bezeichnet: so zum Beispiel bedeutet *A* die Amplydine, *G* den Generator, *M* den Motor, und so weiter. Auch die einzelnen Größen sind in Abb. 4 und Abb. 6 durch gleiche Buchstaben bezeichnet. Zum Beispiel bedeutet u_g die innere Spannung des Generators, n die Drehzahl und so weiter.

Auf der Analogierechenmaschine werden alle Quantitäten und Größen in Form gewisser Spannungen abgebildet. Wir müssen vor Auge halten, daß der maximale Maschinenspannungswert selbst im transienten Zustand höchstens 100 V, d. h. 100 Maschinen-Einheiten betragen kann, andererseits

sind zu kleine Spannungen wegen der Geräusche und der Nullpunktverschiebung der Verstärker unerwünscht. Darum sind auch einige Maßstabveränderungen notwendig. Man muß auch die Vorzeichenumwandlung der Verstärker in Betracht ziehen. Tafel 1 orientiert uns über die Nennwerte der reellen

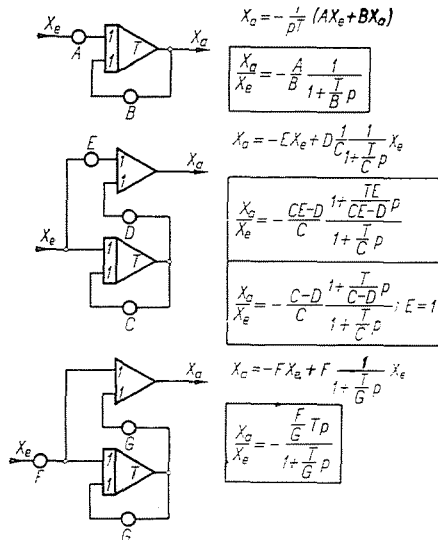


Abb. 5

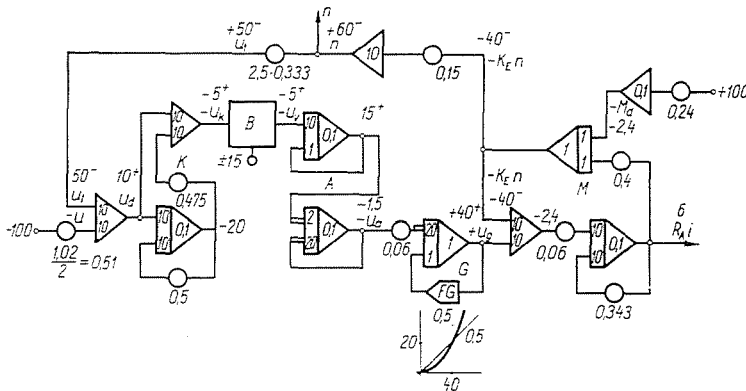


Abb. 6

physikalischen Größen und über die entsprechenden Maschinenspannungen (Maschineneinheiten).

Gelegentlich der Verwirklichung des in Abb. 6 gezeigten Schaltungschemas haben wir vor Auge gehalten, daß der Eingang der Summatoren mit den Verstärkungsfaktoren 0,1; 1 und 10, der Eingang der Integratoren mit 1- und 10fachem Verstärkungsfaktor und die Integrationszeitkonstante mit

Tafel 1

Benennung	Symbole	Nennwert	Maschinen- einheit
Spannungs-Sollwert.....	u_s	204 V	-51
Tachometerspannung.....	u_t	200 V	+50
Differenzspannung.....	u_d	4 V	+10
Kompensationsspannung.....	u_k	0,2 V	-5
Verstärkerspannung.....	u_v	20 V	-5
Amplidynespannung.....	u_a	100 V	-1,5
Generatorspannung.....	u_g	400 V	+40
Spannungsabfall.....	$R_A i$	24 V	+6
Drehmoment.....	M_d	195 mkp	-2,4
Motorspannung (innere).....	K_{EN}	400 V	-40
Drehzahl.....	n	600 U/min	+60

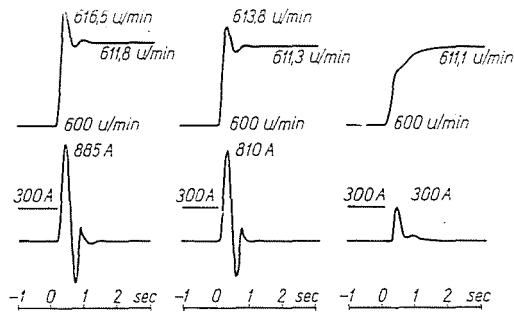


Abb. 7

0,1 sec, bzw. 10 sec ausgebildet werden kann. Die Sättigung des Verstärkers V haben wir mit einer durch Dioden verwirklichten Beschränkungsschaltung B in Betracht gezogen, während die magnetische Kennlinie des Generators durch den im Rückkoppelungskreis eingesetzten Funktionsgenerator FG abgebildet wurde. In der Schaltung kommen über den angeführten Werten auch die in stationärem Zustand aufgenommenen Maschinenspannungen vor. Um Dezimalbrüche zu vermeiden, haben wir nach der Nummer im Index oben die Marken $+$ oder $-$ benutzt, zur Demonstration, daß der betreffende Wert größer oder kleiner ist als der runde Wert.

Abb. 7 zeigt den Drehzahländerungsvorgang, der durch eine ungefähr 2prozentige Sollwert-Spannungserhöhung durchgeführt wurde. Die drei Fälle: a) Generator und der Verstärker sättigen sich gar nicht, sind also linear, b) allein der Generator sättigt sich nach der magnetischen Kennlinie, c) der Generator

und auch der Verstärker sättigen sich. Die oberen Kurven zeigen den Drehzahländerungsvorgang, die unteren Kurven dagegen den Ablauf des Stromes.

Abb. 8 zeigt die Wirkung der zweifachen Momentstöße, d. h. $2 \times 195 \text{ mkp} = 390 \text{ mkp}$ bezüglich der soeben erwähnten drei Fälle. Die oberen Kurven zeigen wieder den Ablauf der Drehzahl, die unteren den Ablauf des Stromes. Bemerkenswert ist, daß dank der Drehzahlregelung statt der natürlichen Drehzahlverminderung von 72 U/min nur wesentlich kleinere Änderungen auftreten.

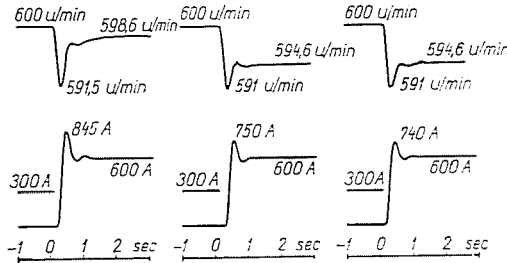


Abb. 8

Auch dieses Beispiel zeigt die Flexibilität der Analogierechenmaschine besonders gut. Mit ihrer Hilfe können recht verwickelte nichtlineare Probleme ziemlich einfach untersucht werden, die sonst ernste Schwierigkeiten verursachen würden.

3.3. Modellierung einer Positionsregelung

Das Forschungslaboratorium für Automatik der Ungarischen Akademie der Wissenschaften [10] hat eine mit einem Gleichstrommotor von ungefähr 15 kW Leistung arbeitende Positionsregelung näher untersucht. Diese Einrichtung selbst kann als Modell einer mit höherer Leistung (zum Beispiel 100 kW oder 200 kW) arbeitenden Positionsregelung aufgefaßt werden, die zum Zweck der Walzenstellung in der Metallurgie angewendet werden kann. Das Schema der Positionsregelung ist in Abb. 9 zu sehen. Die Eingangsspannung des Motors stammt von einem Gleichstromgenerator, die Erregung desselben erzeugt eine Amplydine, welche durch einen im Kompensationskreis liegenden Verstärker rückgekoppelt ist. Vom Tachometergenerator entsteht eine negative Rückführung, welche von der Drehzahl abhängt. Entsprechend der Winkeländerung (Positionsänderung) kann von einem Potentiometer mit 120 V Spannung und 10 Gewinden eine Spannung u_a abgenommen werden, die mit der Sollwertspannung u_s verglichen ist. Im stationärem Zustand stimmen die beiden Spannungen genau überein. Die Regelung ist mit dem Strombegrenzerkreis ergänzt. Die mit dem Strom beinahe proportionale Spannung stammt von den beiden Hilfspolen. Die negative Rückführung wirkt mit Rücksicht

auf den Wirkwiderstandswert der Hilfspole (0,2 Ω) nur dann, wenn der Strom den Wert von 70 A übersteigt. Diesem Stromwert entspricht eine Spannung von 14 V. Zur Sicherung der Stabilität muß man in diese Schleife auch den Kompensationskreis K_2 einschalten.

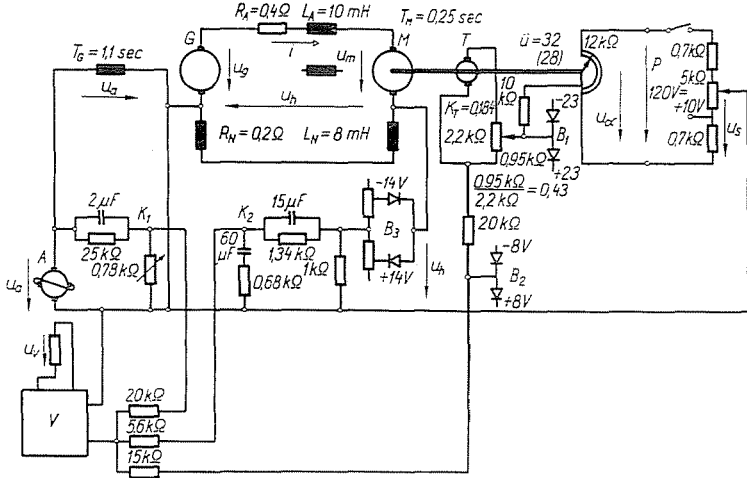


Abb. 9

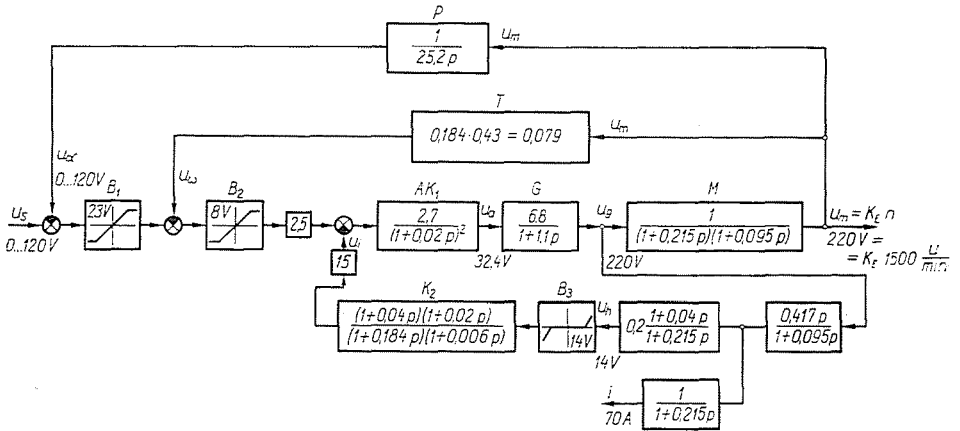


Abb. 10

Abb. 10 zeigt das regelungstechnische Blockschema. Der Vergleich mit dem Schaltungsschema der Abb. 9 wird durch dieselbe Markierung und Bezeichnung erleichtert. Es ist zu bemerken, daß die Amplydine und ihr Kompensationskreis in einem einzigen Regelungsglied zusammengefaßt sind. Hier wollen wir erwähnen, daß die beschränkende Spannung von 8 V mit der Bedingung ausgewählt wurde, daß der Strom i im stationären Zustand im Vergleich zum Wert von 70 A zumeist um ungefähr 10% größer sei. Die andere Grenz-

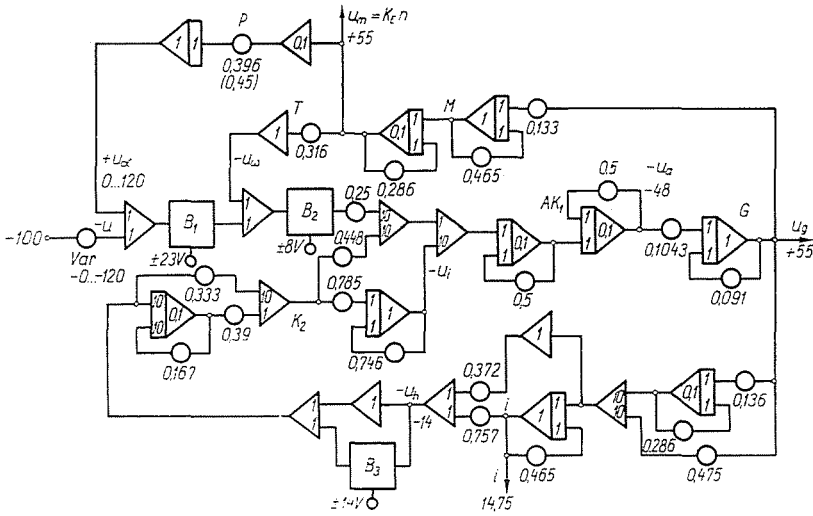


Abb. 11

Tafel 2

Benennung	Symbole	Nennwert	Maschinen-einheit
Zeit	t	1 sec	10 sec
Spannungs-Sollwert	u_s	0...120 V	-0...-120
Potentiometerspannung	u_a	0...120 V	0...-120
Amplidyne spannung	u_a	32,4 V	-48
Generatorspannung (innere)	u_g	220 V	+55
Motorspannung (innere)	u_m	220 V	+55
Drehzahl	n	1500	+55
Drehzahlkonstante	K_E	0,147	1
Motorstrom	i	70 A	14,75
Hilfspolspannung	u_h	14 V	14

spannung von 23 V ist derart gewählt, daß falls der Strom i kleiner ist als 70 A, die innere Spannung des Motors u_m im stationären Zustand ungefähr 220 V erreichen und dementsprechend die Drehzahl eben 1500 U/min sein soll.

Auf Grund der Abb. 10 kann das Schaltungsschema für die Analogierechenmaschine anhand der in Abb. 5 gezeigten Methoden bestimmt werden, wie dies in Abb. 11 zu sehen ist. Es ist zu bemerken, daß jetzt auch der Zeitmaßstab geändert wurde, die Rechenzeit ist nämlich die 10fache der tatsächlichen Zeit.

Weitere Details wollen wir hier umgehen und nur die Nennwerte und die Recheneinheiten der wichtigeren Größen zusammenfassen (siehe Tafel 2).

Zunächst wollen wir einige Diagramme bezüglich des Ablaufs der Position der Drehzahl und des Motorstromes zeigen. Abb. 12 zeigt den Fall, wenn die Sollwertspannung plötzlich auf 50 V erhöht wurde. Es ist zu bemerken, daß einer Spannung von 50 V $32 \times 50 \text{ V} : 12 \text{ V} = 133$ Vollumdrehungen der Motorwelle entspricht, weil das Übersetzungsverhältnis 32 und die Potentiometer-Spannung bezüglich eines Gewindes 12 V ist. Abb. 13 zeigt die zuvor erwähnten

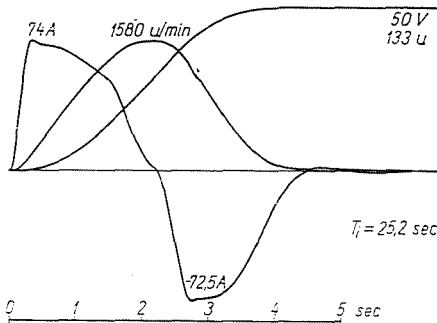


Abb. 12

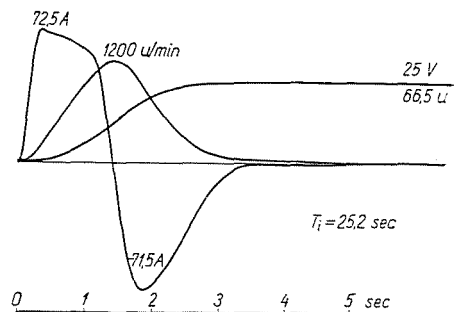


Abb. 13

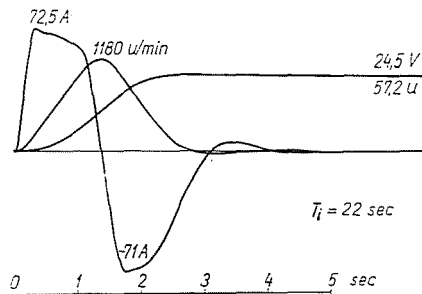


Abb. 14

Größen bei einer Sollwert-Spannungsänderung $u_s = 25 \text{ V}$. Die Zahl der vollen Umdrehungen ist jetzt 66,5.

Abb. 14 bezieht sich gleichfalls auf ungefähr 25 V, genauer 24,5 V Spannungsveränderung, jetzt ist aber die Übersetzung 28, die Zahl der Umdrehungen somit 57,2. Obgleich die Integrationszeitkonstante sich von 25,2 sec insgesamt auf nur 22 sec verändert hat, können wir im Strom bereits eine gewisse Neigung zur Schwingung beobachten und die Position hat auch die Endposition etwas überschungen. Der Positionsänderungsvorgang kann natürlich durch Vergrößerung des zulässigen Stromes im Verhältnis zum Nennstrom noch abgekürzt werden. Kleinere Positionsänderungen enden wesentlich schneller.

4. Schlußfolgerungen

In den obigen Ausführungen haben wir die in der Elektrotechnik gebräuchlichen Modellierungsmethoden betrachtet, welche auch in der Elektrotechnik des Hüttenwesens gewisse Bedeutung haben.

Wir haben uns etwas ausführlicher mit der Analogierechenmaschine befaßt, die eine der wirksamsten Mittel zur Lösung regelungstechnischer Fragen ist. Die vorgeführten Beispiele bestätigen auch, daß so komplizierte Probleme wie verwickelte, mehrschleifige, nichtlineare Regelungssysteme mit dem Analogierechner verhältnismäßig einfach untersucht werden können und auch die verschiedensten Parameter-Veränderungen leicht in die Rechnung einbezogen werden können. Es kann also auch die Optimierung leicht durchgeführt werden.

Es kann nicht bezweifelt werden, daß mit der raschen Entwicklung der Technik die Bedeutung der Analogiemodelle im allgemeinen, besonders aber jene der universellen Analogierechenmaschine immer mehr zunehmen wird und der Analogerechner nicht nur zum wichtigen Hilfsmittel der Forschung, sondern auch der Alltagstätigkeit des Ingenieurs gehören.

Zusammenfassung

Erst werden die in der allgemeinen Elektrotechnik gebrauchten Modelle überprüft, dann werden mittels der Analogierechenmaschine drei Antriebsprobleme: wie Grobanlauf des Gleichstrommotors, Drehzahlregelung und Positionsregelung modelliert und untersucht.

SCHRIFTTUM

1. Anwendung elektrischer Rechenanlagen in der Starkstromtechnik, VDE Buchreihe Band 3. VDE Verlag, GmbH. Berlin 1958.
2. Berichte des Forschungsinstitutes für Elektro-Energie (VILLENKI, Budapest) No. 18. (1954). No. 81. (1955). No. 138. (1956).
3. Berichte des Forschungsinstitutes für Elektroenergie (VILLENKI, Budapest) No. 349. (1962).
4. Berichte des Forschungsinstitutes für Elektroenergie (VILLENKI, Budapest) No. 284. (1960). No. 350. (1961).
5. KORN, G. A.—KORN, TH. M.: Elektronische Analogierechenmaschinen, Stuttgart, Berliner Union 1960.
6. IVALL, T. E.: Electronic Computers, London 1960.
7. TRUITT, TH. D.—ROGERS, A. E.: Basic of analog computers, New York 1960.
8. КОГАН, В. J.: Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. Moskau 1959.
9. KELEMEN, T.: Untersuchung der Anlaß-Eigenschaften fremderregter Gleichstrommotoren. Kandidaten-Dissertation Budapest 1962.
10. RÁCZ, I.—BAUSZ, I.—HORVÁTH, M.—JÁRDÁN, R. K.: Digitale Regelanlage zu elektrischen Antrieben (Bericht des Forschungslaboratoriums für Automation der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest 1961).

Prof. Dr. Frigyes CsÁKI, Budapest XI., Egri József u. 18, Ungarn.