

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 47 (1956)
Heft: 2

Artikel: Die Anwendung elektronischer und magnetischer Verstärker für die Steuerung von Antrieben
Autor: Güttinger, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058190>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Désignations en diverses langues d'éléments «synchros»

Tableau I

Français	Anglais/Américain	Allemand	Italien
Transmetteur	Transmitter Generator	Geber	Trasmittitore
Récepteur de téléaffichage	Receiver Repeater Motor	Empfänger	Ricevitore Ricevitore di coppia
Synchro-détecteur Récepteur de synchro-détection Transformateur de contrôle	Control Transformer Coincidence Transmitter	Kontrolltransformator	Trasformatore di controllo
Transmetteur différentiel	Differential Transmitter Differential Generator Follow-through-Transmitter	Differential-Geber	Trasmittitore differenziale
Récepteur différentiel	Differential Receiver Differential Motor Hunter Motor	Differential-Empfänger	Ricevitore differenziale
Déphaseur Resolver Transformateur de coordonnées Variomètre	Resolver	Resolver	Risolutore

Lorsque des confusions sont possibles, on peut faire précéder les désignations françaises, anglaises et allemandes du mot «synchro-», et les désignations italiennes du mot «sincrono-».

placé de telle sorte qu'il en résulte une tension de sortie un peu plus élevée, ce qui compense la baisse

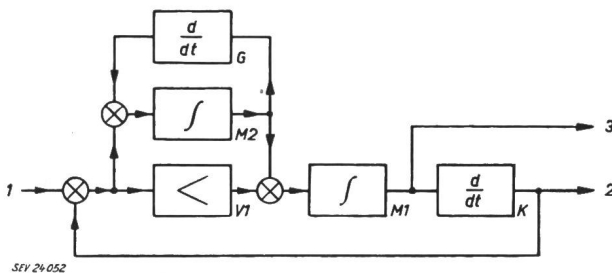


Fig. 22

Schéma de l'équipement de mesure de consommation du carburant selon fig. 21

1 valeur mesurée de la vitesse de débit; 2 valeur affichée de la vitesse de débit; 3 consommation totalisée, valeur affichée par le compteur; V1 amplificateur; M1, M2 éléments intégrateurs (moteurs); K élément différentiateur (accouplement magnétique à courants de Foucault); G génératrice tachymétrique

d'amplification. Le rapport de transmission entre M2 et K T 1 est choisi suffisamment grand pour que le système ait déjà cessé d'osciller avant que le rotor du K T 1 se soit notablement déplacé, lors

d'une modification du débit de l'essence. L'alter-nateur tachymétrique G sert à la stabilisation du circuit auxiliaire de réglage.

Appendice

Les désignations des différentes formes des appareils synchros ne sont pas encore bien normalisées. Toutefois, une normalisation est en train de s'établir, basée surtout sur les normes américaines. Le tableau I indique quelques-unes des expressions les plus fréquentes.

Bibliographie

- [1] Johnson, T. C.: Selsyn Design and Application. Electr. Engng. t. 64(1945), n° 10, p. 703...708.
- [2] Blackburn, John F.: Components Handbook. Massachusetts Institute of Technology, Radiation Laboratories Series, t. 17. New York: McGraw-Hill 1949.
- [3] Chestnut, H.: Electrical Accuracy of Selsyn Generator-Control Transformer System. Trans. AIEE t. 65(1946), n° 8/9, p. 570...576.
- [4] Umlauf, H.: Aus Theorie und Praxis der Fernübertragungssysteme für unmittelbare Winkelwertübertragung. Feinwerktechn. t. 59(1955), n° 1, p. 1...10.
- [5] Glass, J. P. et P. F. Bechberger: Precision Autosyns for Servo Systems. Aeron. Engng. Rev. t 5(1946), n° 6.
- [6] Bell, J.: Some Aspects of Electrical Computing. Electronic Engng. t. 23(1951), n° 280, p. 213...216, et n° 281, p. 264...269.

Adresse de l'auteur:

M. Müller, Dr sc. techn., Balgriststrasse 106, Zurich 8/32.

Die Anwendung elektronischer und magnetischer Verstärker für die Steuerung von Antrieben

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 10. November 1955 in Olten, von W. Güttinger, St. Gallen

621.375.2 + 621.375.3 : 621.34.07

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einer kurzen Zusammenstellung der Eigenschaften elektronischer und magnetischer Verstärker, soweit sie das Verhalten des geschlossenen Regelsystems beeinflussen.

Bref aperçu des propriétés d'amplificateurs électroniques et magnétiques, en ce qui concerne le comportement du système de réglage en circuit fermé.

Will man irgend eine charakteristische Grösse einer Maschine, wie Drehzahl, Drehmoment, Leistung usw. steuern, so stehen prinzipiell zwei Möglichkeiten offen:

a) Die offene Regelung, bei welcher die Energiezufuhr oder ganz allgemein eine Eingangsgrösse variiert wird, um eine gewisse Ausgangsgrösse zu beeinflussen. Da die Ausgangsgrösse aber nicht stets eine absolut eindeutige Funktion der Eingangsgrösse ist, so ist die offene Regelung oft nicht

von genügender Genauigkeit; in vielen Fällen lässt auch die Ansprechgeschwindigkeit zu wünschen übrig.

b) Im *geschlossenen Regelsystem* wird die zu regelnde Grösse gemessen und die Eingangsgrösse stets automatisch so variiert, dass die Ausgangsgrösse dem Sollwert entspricht.

Beide Systeme finden Anwendung bei allen Sorten von Antriebsmaschinen, seien sie elektrischer, thermodynamischer oder hydraulischer Natur. Die folgende Arbeit wird sich auf elektrische Antriebe und im speziellen auf Gleichstrommaschinen beschränken.

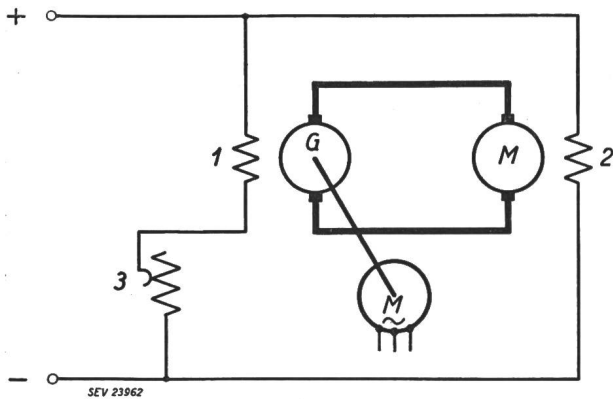


Fig. 1

Ward-Leonard-Antrieb ohne Rückführung als Beispiel einer offenen Regelung (Steuerung)

1 Generatorfeld; 2 Motorfeld; 3 Widerstand

Als Beispiel eines offenen Regelsystems sei der bekannte Ward-Leonard-Antrieb erwähnt (Fig. 1). Ein Generator wird von einem Asynchronmotor angetrieben. Die Generatorspannung ist eine Funktion der Erregung, welche mittels eines variablen Widerstandes verändert werden kann. Da die Erregung des Motors konstant ist, so ist die Drehzahl dieser Gleichstrommaschine abhängig von der Generatorspannung. Jeder Stellung des Widerstandes entspricht eine gewisse Drehzahl des Motors; da aber ausser der Generatorspannung auch andere Faktoren von Einfluss auf die Motordrehzahl sind, so ist die Regelung mittels Widerstand ungenau. Werden an den Antrieb höhere Forderungen betreffend Genauigkeit und Regelgeschwindigkeit gestellt, so muss die Drehzahl gemessen und kontinuierlich geregelt werden.

Das Blockschaema eines geschlossenen Regelsystems zeigt Fig. 2: Dieses gilt sowohl für hydraulische, thermodynamische wie für elektrische Anlagen. Handelt es sich um ein elektrisches System, so muss zunächst die zu regulierende Grösse in ein elektrisches Signal umgewandelt werden, also z. B. eine Drehzahl mittels eines Tachometergenerators in eine der Drehzahl proportionale elektrische Spannung. Die erzeugte Spannung wird mit einer Sollspannung verglichen, die proportional der gewünschten Drehzahl ist. Sind die beiden Spannungen (Tachometerspannung oder Messgrösse bzw. Sollspannung) einander nicht genau gleich, so ist auch eine Differenz in der Ausgangsgrösse, in diesem Falle in der Drehzahl vorhanden. Die Energiezufuhr ist nun so zu steuern, dass diese Differenz kompensiert wird. Die Energien, welche im Messkreis zur Verfügung stehen, sind aber im all-

gemeinen viel zu klein, um eine Maschine zu beeinflussen. Man benötigt deshalb dazu einen Leistungsverstärker. Als Verstärkerelemente in Gleichstromantrieben werden heute hauptsächlich folgende verwendet:

- Elektronische Verstärker;
- Magnetverstärker;
- Verstärkermaschinen.

Im folgenden soll ein Vergleich zwischen elektronischen und magnetischen Verstärkern gezogen werden, welche heute oft in Konkurrenz zueinander stehen. Es sollen die Gesichtspunkte erläutert werden, die für bestimmte Fälle die Wahl des einen oder des andern Elementes als richtig erscheinen lassen. Zur Analyse verwenden wir wieder ein konkretes Beispiel, nämlich die Steuerung bzw. die Regelung eines Ward-Leonard-Antriebes.

Bei der elektronischen Lösung besteht der Vorverstärker aus einem Gleichspannungsverstärker mit 1...2 Stufen; als Leistungsverstärker wird man im allgemeinen ein System mit Thyatronröhren verwenden.

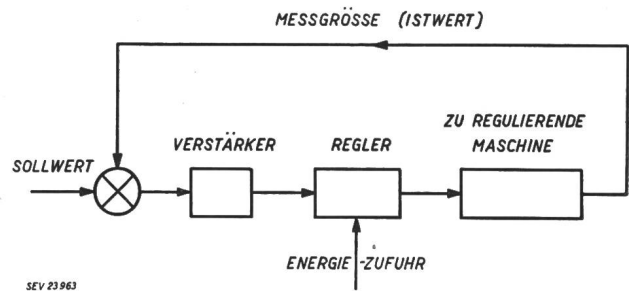


Fig. 2

Blockschaema eines geschlossenen Regelkreises

Beim magnetischen Verstärker sind bei grösseren Leistungen auch 2 Stufen notwendig, nämlich ein Vorverstärker (Ringkerntransduktor) und ein Leistungstransduktor. Bei kleineren Einheiten genügt ein einzelner Magnetverstärker.

Ein selbstsättigender Magnetverstärker besteht aus zwei Arbeitswicklungen und einer Anzahl Steuerwicklungen. Der Gleichspannungsausgang des Verstärkers ist eine Funktion von den in den Steuerwicklungen erzeugten Ampèrewindungen. Dadurch, dass für Referenz- und Messgrösse verschiedene Wicklungen verwendet werden können, ergeben sich bereits zwei grosse Vorteile des magnetischen Verstärkers gegenüber dem elektronischen:

a) Es ist möglich, die beiden Grössen sowie andere Einflussgrössen miteinander in Verbindung zu bringen, ohne dass dadurch galvanische Kopplungen entstehen, was beim elektronischen Verstärker oft Schwierigkeiten verursacht.

b) Zur Erzeugung einer gewissen Anzahl Ampèrewindungen kann eine grosse Anzahl Windungen mit einer kleinen Stromstärke oder eine grosse Stromstärke mit einer kleinen Anzahl Windungen kombiniert werden, wodurch eine leichte Anpassung an verschiedene Spannungs- bzw. Stromquellen möglich wird.

Eine der wichtigsten Grössen für die Beeinflussung des Regelsystems ist der Verstärkungsgrad des Verstärkerelementes. Er ist in erster Linie, aber nicht ausschliesslich massgebend für die Genauigkeit der Regelung. Eine anschauliche Erklärung

gibt Fig. 3. Nimmt man an, dass infolge einer Zunahme der Belastung die Motordrehzahl um 10% absinken würde bei gleichbleibender Generator-EMK, so muss die Erregung um soviel erhöht werden, dass eine ca. 10% höhere Generatorspannung erzeugt wird, um die Motordrehzahl konstant zu

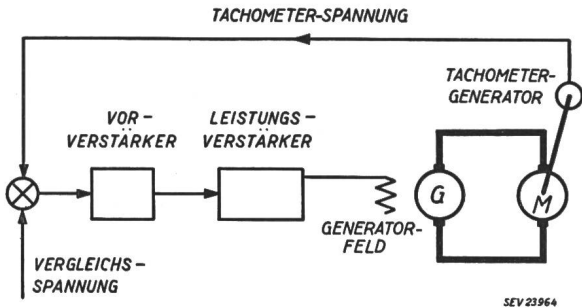


Fig. 3

Ward-Leonard-Antrieb in geschlossenem Regelkreis

halten. Eine gewisse Spannungsänderung am Eingang des Verstärkers ist notwendig, um die Spannung im Generator heraufzutreiben. Dadurch entsteht ein sog. Restfehler. Dessen Grösse ist

$$f = \frac{F}{1 + v}$$

- f* Restfehler
- F* Fehler des offenen Regelsystems
- v* Verstärkungsgrad

Zu erwähnen ist noch, dass nicht der Verstärkungsgrad des Verstärkers allein, sondern des ganzen Systems massgebend ist:

$$v = \frac{\Delta a}{\Delta e}$$

(Δa ist die Änderung der zu regulierenden Grösse, hervorgerufen durch eine Änderung Δe am Verstärkereingang.)

Somit hat es keinen Zweck, einen Verstärker leistungsfähig zu bauen und nachher einen Tachometergenerator zu verwenden, der eine zu kleine Spannung abgibt.

Nebst diesem Restfehler der Regelung gibt es aber noch andere Fehler, welche meistens schwieriger zu erfassen und zu beheben sind. Fehler, welche durch Änderung der Maschinencharakteristik oder gewisser Reglereigenschaften entstehen, werden mit dem vorangehenden Verstärkungsgrad des Regelkreises kompensiert (Erwärmung, Hysterese der Maschinencharakteristik, Verschiebung der Charakteristik der Thyratrons etc.). Dadurch erklärt sich, dass die schlimmsten Fehler diejenigen sind, welche sich am Eingang des Regelkreises einschleichen. Gewisse Variationen wirken sich nämlich aus wie eine Änderung der Sollgrösse.

Untersuchen wir zunächst Röhrenverstärker. Dort werden Messgrösse und Sollgrösse meistens vor dem Eingang ins Steuergitter der ersten Verstärkerstufen gemischt. Wegen Streuungen in der Röhre ist die für eine gewisse Ausgangsspannung notwendige Eingangsspannung nicht ganz konstant. Für diese Schwankungen sind verschiedene Vorgänge in der Röhre massgebend, z. B. die Änderung der Austrittsarbeit, Zwischenschichtbildung an der

Kathode usw. Um nun eine gewisse Ausgangsspannung am Verstärker zu erreichen, muss die Messgrösse ihren Wert ändern, wodurch ein Fehler entsteht. Die Änderungen, die am Eingangsgitter notwendig sind, um solche Variationen in der Röhre selbst auszugleichen, sind in der Grössenordnung

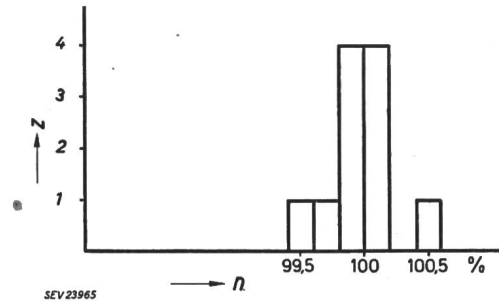


Fig. 4

Streuung eines mit elektronischem Verstärker geregelten Ward-Leonard-Antriebes bei Verwendung von 11 verschiedenen Verstärkerröhren
z Anzahl Röhren; n Drehzahl

von 1 V. Für die Genauigkeit des Antriebes ist das Verhältnis der Meßspannung zu diesen Variationsspannungen massgebend. Man sieht auch hier wieder deutlich, dass Vergleichs- und Meßspannungen gross sein sollten. Die Streuungen an der ersten Verstärkerröhre kann man einteilen in Variationen ein und derselben Röhre im Laufe ihrer Lebensdauer, oder aber in Verschiedenheiten zwischen einzelnen Röhren des gleichen Typs. Fig. 4 zeigt die Änderungen der Drehzahl eines Antriebes bei Verwendung von 11 verschiedenen Röhren unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen.

Nebst den Verschiedenheiten der Röhre selbst sind auch Einflüsse von aussen auf den Verstärker von Bedeutung. Im Gegensatz zu den Schwankungen in der Röhre selbst sind diese Einflüsse relativ harmlos, da man die verschiedenen Spannungen stabilisieren kann. Eine unangenehmere Fehler-

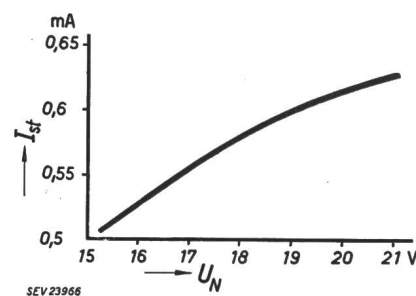


Fig. 5

Einfluss der Netzspannung auf den Kontrollstrom eines Magnetverstärkers bei gleichbleibendem Ausgangstrom
I_{st}: Steuerstrom; *U_N*: Netzspannung

quelle, der nur schwierig zu begegnen ist, ist z. B. die Unstetigkeit der Vergleichsspannung. Stabilisatorröhren haben heute einen beachtlichen technischen Stand erreicht. Trotzdem sind die Unstetigkeiten in der Brennspannung in der Grössenordnung der Genauigkeit eines modernen Antriebes.

Analoge Genauigkeitsüberlegungen können für den magnetischen Verstärker angestellt werden. Beim Eingang in diese Verstärker rechnet man nicht mit Spannungen, sondern mit Ampèrewin-

dungen. Analog zum Röhrenverstärker kann die Forderung gestellt werden, dass die Ampèrewindungen, die durch die Messgrösse und die Vergleichsgrösse erzeugt werden, gross sind im Vergleich zu den Ampèrewindungen, die als Streuung im Verstärker selbst auftreten. Fig. 5 zeigt den Einfluss der Netzspannung auf einen bestimmten Typ von Magnetverstärker, Fig. 6 eine Hysteresekurve. Die Breite des Hysteresebandes ist ein Mass für die Streuung der zu regelnden Grösse. Bei hochgezüchteten Transduktoren kann diese Breite praktisch auf Null reduziert werden.

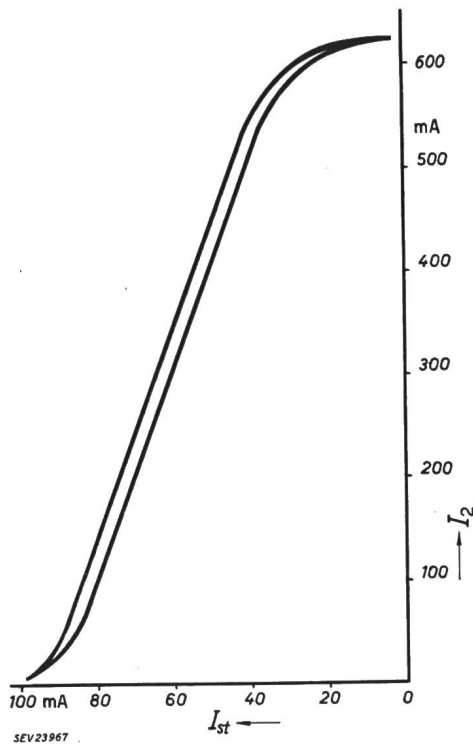


Fig. 6
Hysteresis-Kurve eines Transduktors
 I_2 Ausgangsstrom; I_{st} Steuerstrom

Bis dahin haben sich alle Betrachtungen dieses Artikels auf das statische Verhalten des Regelsystems bezogen. Ebenso wichtig sind aber die dynamischen Eigenschaften. Das dynamische Verhalten eines geschlossenen Regelkreises kann einigermaßen charakterisiert werden durch den zeitlichen Verlauf der zu regelnden Grösse nach einer plötzlich auftretenden Störung (sog. Einheitsstoss). Fig. 7 zeigt das Verhalten eines Ward-Leonard-Antriebes nach einem Laststoss, d. h. bei plötzlicher Belastung des Motors. Wäre das System ohne Regelung, dann würde die Drehzahl von n_0 bei Leerlauf, auf n_L bei Vollast fallen. Die Regelung setzt sich diesem Vorgang entgegen und bringt die Drehzahl bis auf einen kleinen Restfehler wieder auf den ursprünglichen Wert.

Die Grössen, die uns nun interessieren, sind

- Wie gross ist der maximale Fehler während des Ausgleichsvorganges?
- Wie schnell ist der Fehler ausgeregelt?
- Wie gross ist die Dämpfung des Systems, d. h. wie stark überschwingt die zu regelnde Grösse während des Ausgleichsvorganges?

Diese uns interessierenden Grössen sind keineswegs nur eine Funktion von den verwendeten Verstärkern und Reglern, sondern von den Maschinen- und Regelgrössen in ziemlich verwickelter Form abhängig. Um die Regelvorgänge mathematisch zu erfassen, muss man die Differentialgleichungen der einzelnen Abschnitte des Regelsystems kennen. Nehmen wir wiederum das Beispiel des Ward-Leonard-Antriebes mit automatischer Regelung. Wenn man von gewissen Nichtlinearitäten und von der Ankerinduktivität absieht, so besteht das Regelsystem aus einer Kette von zwei Gliedern mit je

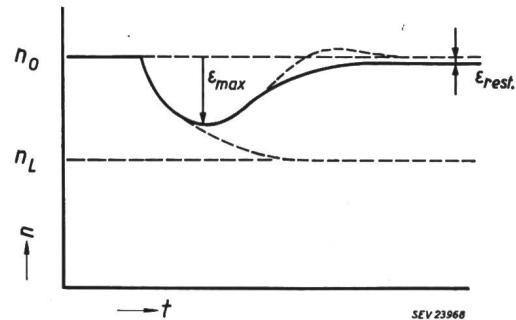


Fig. 7
Verlauf der Regelgrösse nach einer plötzlichen und bleibenden Störung

ϵ_{max} maximaler Fehler während des Ausgleichsvorganges;
 ϵ_{rest} Restfehler (statischer Fehler); n_0 Regelgrösse vor der Störung; n_L Regelgrösse nach der Störung im offenen Regelsystem; n Drehzahl; t Zeit

einer Zeitkonstante und einem Verstärkungsfaktor. Die Regelgeschwindigkeit und die Stabilität sind bei einem solchen System eine Funktion dieser drei Grössen. Um zu einem kritisch gedämpften Regelkreis zu gelangen, darf bei einem gewissen Verhältnis der beiden Zeitkonstanten eine gewisse Verstärkung nicht überschritten werden.

Zusätzliche Zeitkonstanten im Regler oder Verstärker wirken sich ungünstig aus auf das System, sowohl auf das schnelle Reagieren wie auch auf die Stabilität. Fig. 8 zeigt den gleichen Ward-Leonard-

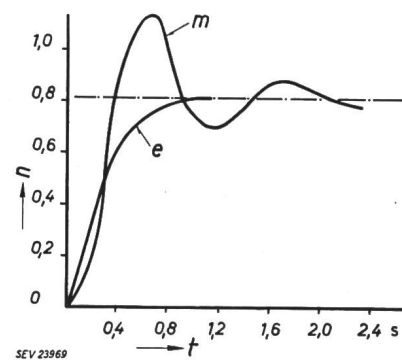


Fig. 8
Vergleich eines Regelsystems mit zwei Zeitkonstanten von $T_1 = 0,2$ s und $T_2 = 0,6$ s
 e Einschwingen einer Regelgrösse mit elektronischem Verstärker ohne Zeitkonstante
 m Einschwingvorgang desselben Systems mit gleichem Verstärkungsgrad und magnetischem Verstärker mit einer Zeitkonstante von 0,1 s

Antrieb einmal kritisch gedämpft mit elektronischem Verstärker, das andere Mal mit einem magnetischen Verstärker mit gleichem Verstärkungsgrad. Beide Male wurden keine speziellen Stabili-

siermassnahmen verwendet. Normalerweise können durch stabilisierende Netzwerke beide Systeme stabil gemacht werden, allerdings nur auf Kosten der Regelgeschwindigkeit. Würden wir also das System mit Magnetverstärkern stabilisieren, so würde der Regelverlauf viel flacher sein als beim elektronischen Verstärker. Damit ist gezeigt, wie der elektronische Verstärker dort mit Vorteil verwendet wird, wo eine schnelle Regelung von Wichtigkeit ist.

Zum Abschluss sollen einige praktische Überlegungen an die mehr theoretischen Teile beider Verstärkerelemente angeknüpft werden. Es gibt eine grosse Anzahl von Anwendungen, bei welchen die Wahl des Verstärkerelementes von keiner besonderen Bedeutung ist. Magnetverstärker sind

langsamer, sie lassen sich oft nur mit grossen Schwierigkeiten an verwickelte oder komplizierte Antriebssysteme anpassen. Meistens sind sie auch teurer in der Anschaffung. Dafür haben sie aber keine Teile, welche einer natürlichen Abnutzung unterworfen sind, wie z. B. die Elektronenröhre. Der Gang der Entwicklung in den letzten Jahren zeigte keine deutliche Tendenz zugunsten des einen oder andern Elementes, sondern zugunsten beider Varianten, da der Bedarf für automatische Regelungen in allen Arbeitsprozessen in rapidem Ansteigen begriffen ist.

Adresse des Autors:

W. Güttinger, Ingenieur, Schindler Aufzüge- und Motorenfabrik, St. Gallen.

Diskussionsbeitrag

621.375.2 + 621.375.3 : 621.34.07

Ein wichtiges Problem, insbesondere in der Textiltechnik, ist das Aufwickeln von Ketten und Geweben mit konstantem Zug und konstanter Geschwindigkeit, ohne dass diese Grössen direkt gemessen werden. Das Beispiel einer ausgeführten Anlage soll die Probleme und ihre Lösungen näher erläutern: Gefordert wurden:

1. Geschwindigkeitsbereich des Wickelgutes: 1 : 16;
2. Zugbereich: 1 : 14;
3. Änderung des Wickeldurchmessers: $d : d_1 = 1 : 6$.

Die Grundschaltung zur Lösung dieses Problems besteht aus einem Leonard-Generator und einer Zusatzmaschine, die die Ankerspannung des Wickelmotors bestimmen. Geregelt werden über Magnetverstärker das Feld des Zusatzgenerators und des Wickelmotors. Betrachten wir zuerst den Wickelvorgang bei einer bestimmten Gewebe- oder Ketten-Geschwindigkeit und einem vorgewählten Zug (Fig. 1).

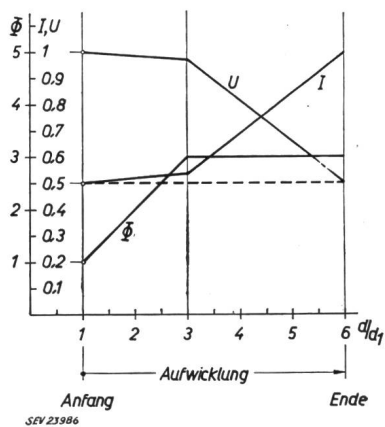


Fig. 1

Verlauf von Ankerspannung U , Ankerstrom I und Feldstärke Φ des Wickelmotors während des Aufwickelvorganges
 d_1 Wickeldurchmesser zu Beginn des Aufwickelvorganges;
 d jeweiliger Durchmesser während des Aufwickelns

Der Durchmesser des Wickelbaumes hat zu Beginn sein Minimum ($d/d_1 = 1$), der Wickelmotor muss also mit maximaler Drehzahl laufen. An seinem Anker liegt die der eingestellten Arbeitsgeschwindigkeit entsprechende Summe aus Leonard-Generator- und Zusatzgenerator-Spannung an. Das Feld ist im Verhältnis 3 : 1 geschwächt. Mit zunehmendem Durchmesser wird das Motorfeld bis auf seinen Nennwert verstärkt, während die Ankerspannung und der Ankerstrom konstant gehalten werden. Die geringe Neigung dieser Kurven rührt von der Statik der Magnetverstärker her. Bei weiterer Zunahme des Wickeldurchmessers bleibt das Motorfeld konstant, die Ankerspannung nimmt im Verhältnis 2 : 1 ab, der Ankerstrom in demselben Verhältnis zu. Der gesamte Regelbereich beträgt somit 1 : 6.

Das Aufwickeln mit konstantem Zug und konstanter Geschwindigkeit erfordert eine Regelung auf konstante Leistung. Daher sind Strom und Spannung des Wickelmotors zur Steuerung in die Magnetverstärker eingeführt. Die Arbeitsgeschwindigkeit lässt sich durch Verändern des Feldes des Leonard-Generators und des Zusatzgenerators einstellen. Der Zug kann in vier Grobstufen vorgewählt werden, innerhalb derer Feineinstellung möglich ist. Es werden damit die Sollwerte der Magnetverstärker entsprechend geändert.

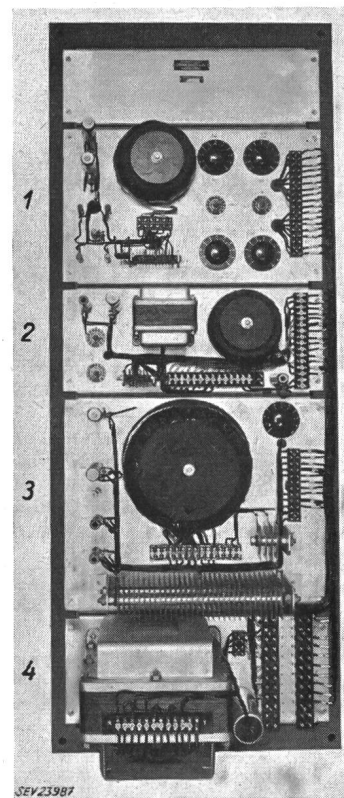


Fig. 2

Aufbau der magnetischen Liftsteuerung

- 1 Sollwertgeber; 2 Vorverstärker; 3 Endverstärker;
- 4 Stabilisierung

Schwierigkeiten bereiten die Reibungsverluste, die insbesondere bei kleinen Zügen grosse Fehler verursachen. Sie konnten jedoch durch Kompensationseinflüsse auf die beiden Magnetverstärker weitgehend ausgeschaltet werden. Um auch beim Beschleunigen und Verzögern konstanten Zug zu erhalten, werden kleine Zusatzmagnetverstärker verwendet,