

# DIE WIRKUNG DES ZEITLICHEN ABLAUFES DES STATORSTROMES AUF DIE ANLAUFZEIT BEI EINPHASIGEN UZF-ANTRIEBEN MIT PERMANENTMAGNETERREGTER SYNCHRONMASCHINE

Von

A. KÁRPÁTI

Lehrstuhl für Automatisierung, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 2. Januar 1974)

Vorgelegt von Prof. Dr. F. CsÁKI

## I. Einführung

Die Ultrazentrifugen (UZF) werden in der Chemie für die Untersuchung von Stoffen mit großem Molekulargewicht und in der Medizin erfolgreich verwendet. An der Meßstelle des Rotors der modernen UZF tritt eine große Feldkraft auf, die für das Trennen von Molekülen geeignet ist. Bei den in der Praxis verbreiteten Rotorabmessungen muß der Rotor mit einer Drehzahl von 60 000 U/Min oder darüber angetrieben werden.

Die modernen, hochleistungsfähigen UZF enthalten meistens übersetzungslose Antriebe mit Elektromotoren. In der Praxis weichen die Massen und Inertiemomente der Rotoren der verschiedenen UZF Typen nur wenig voneinander ab. So beträgt auch die für das Erreichen der Drehzahl von 60 000 U/Min notwendige Zeit (bei Al-Rotor), meistens etwa 10 Min. Aus der Masse des Rotors und aus den Verlusten ergibt sich die notwendige Motorleistung bei 60 000 U/Min etwa zu 0,9 kW.

Die analytische UZF ist ein Gerät für Forschungszwecke. Für den Betrieb sind die häufigen Starte und Abbremsungen kennzeichnend. Eine möglichst kurze Anlaufzeit ist von entscheidender Bedeutung. (Diese ist nicht einfach zu gewährleisten, weil wegen der Anordnung des optischen Systems für den Einbau des Motors nur ein Raum von  $100 \times 100 \times 100$  mm zur Verfügung steht.)

In der modernen UZF wird heute der Rotor entweder durch eine Asynchronmaschine mit Kurzschlußläufer oder durch einen selbstgetakteten Stromrichtertermotor (mit Permanentmagnetregung) angetrieben.

Die untersuchte Maschine ist von letzterem Typ. Ihr schematischer Aufbau ist in Abb. 1 gezeigt.

Die Maschine wird durch den Wechselrichter in Abb. 2 gespeist. Der Wechselrichter wird auf photoelektrischem Wege bei Messung der Winkel- lage des Läufers durch den Motor selbst gesteuert. Eine besondere Elektronik sichert die Phasenverschiebung zwischen dem Zündwinkel des Wechselrich-

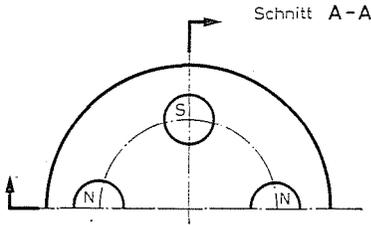
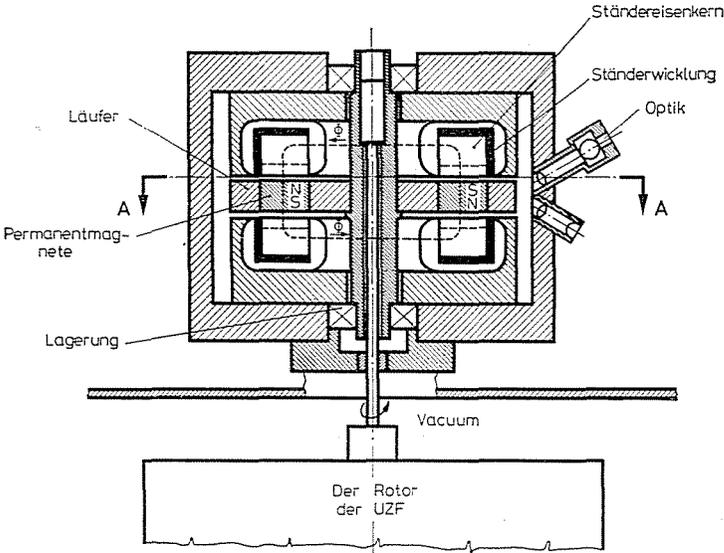


Abb. 1

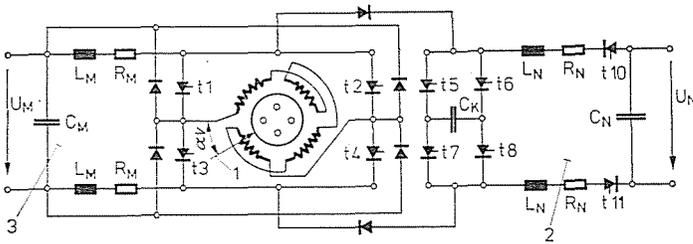


Abb. 2

id der Winkellage des Rotors. Der Verschiebungswinkel muß in Abhän-  
: von der Drehzahl und von dem Ständerstrom geändert werden, um  
gebenem Strom das maximale Drehmoment des Motors zu gewähr-  
. In solcher Anordnung kann die Drehzahl des Motors, ähnlich wie die  
mderregten Gleichstrommaschine, durch die Klemmenspannung gere-  
werden.

Der Motor arbeitet unter schweren Startbedingungen. Die Anlaufzeit wird auch dadurch beeinflusst, nach welcher Zeitfunktion der Ständerstrom während der verhältnismäßig langen Startzeit geändert wird. In den folgenden werden die Ergebnisse solcher Untersuchungen zusammengefaßt.

## 2. Die Bestimmung der auf den Läufer des Motors wirkenden Kräfte

Auf den Läufer des Motors wirken die folgenden Kräfte:

a) Das Drehmoment aus der Wechselwirkung zwischen Ständerstrom und Permanentmagneten des Rotors  $m_s = m_s(I, \theta)$ , wobei

$I = I(t)$  die Zeitfunktion des Effektivwertes des Ständerstromes

$\theta = \theta(t)$  der Mittelwert der Läufer Temperatur sind.

b) Das durch das gegenrotierende Feld des einphasigen, als sinusförmig angenommenen Ständerstromes erzeugte Bremsmoment  $m_b = m_b(f, I, \theta)$ , wobei  $f$  die Frequenz der Speisespannung ist.

c) Das Belastungsmoment  $m_l = m_l(f)$ , das die durch Reibungs- und Ständereisenkernverluste verursachten Bremsmomente enthält.

## 3. Die Bestimmung der einzelnen Drehmomentkomponenten

a) Die Bestimmung des Drehmomentes  $m_s = m_s(I, \theta)$ :

Das auftretende Drehmoment wird durch die Eigenschaften des verwendeten Magnetstoffes stark beeinflusst. Im untersuchten Motor wurden BaFe-Magnete angewandt. Abb. 3 zeigt die Entmagnetisierungskurve derselben. Die erwähnten Stoffe sind dadurch gekennzeichnet, daß die Entmagnetisie-

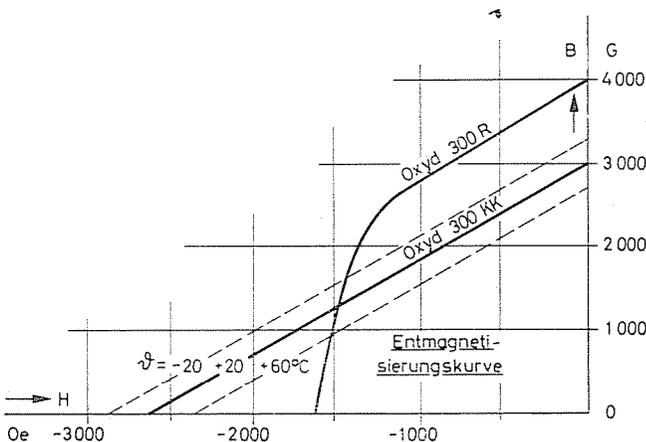


Abb. 3

rungskurve in einem breiten Intervall linear verläuft und dementsprechend beim Aussetzen der entmagnetisierenden Feldstärke die ursprüngliche Remanenz auftritt. Dadurch werden die Untersuchungen sehr vereinfacht, weil die Permanentmagnete durch eine konstante Erregung ersetzt werden können und man bei konstanter Temperatur einen linearen Zusammenhang erhält.

Bei zunehmender Temperatur werden die Kennlinien, den ursprünglichen Kennlinien parallel, den kleineren Induktionen zu verschoben. Das kann durch die Temperaturabhängigkeit der Ersatzerregung berücksichtigt werden, weil die Änderung von reversiblen Charakter ist. Für den angewandten Magnetstoff zeigt Abb. 4 die Temperaturabhängigkeit der relativen Induktion bzw. des relativen Drehmomentes bei konstantem Strom. Die gemessene Kurve kann mit guter Näherung durch die folgende mathematische Formel angegeben werden:

$$\frac{m_s}{m_{s30}} = \sqrt{1 - k_1 \cdot (\Theta - 30^\circ)} = f_{ms\Theta} \quad (1)$$

Unter Berücksichtigung des Gesagten wird das Drehmoment  $m_s$  in der Form geschrieben:

$$m_s = k_2 \cdot I \cdot f_{ms\Theta} \quad (2)$$

b) Die Bestimmung des Drehmomentes  $m_b = m_b(f, I, \Theta)$ :

Das Bremsmoment des gegenlaufenden Feldes des Statorstromes ist dem Quadrat des Statorstromes proportional, hängt vom Material des Läufers, von der Frequenz (Drehzahl) und der Temperatur ab.

Die Material- und Frequenzabhängigkeit wird am zweckmäßigsten durch Messungen bestimmt. Abb. 5 zeigt die Meßergebnisse bei 30 °C Läufertempe-

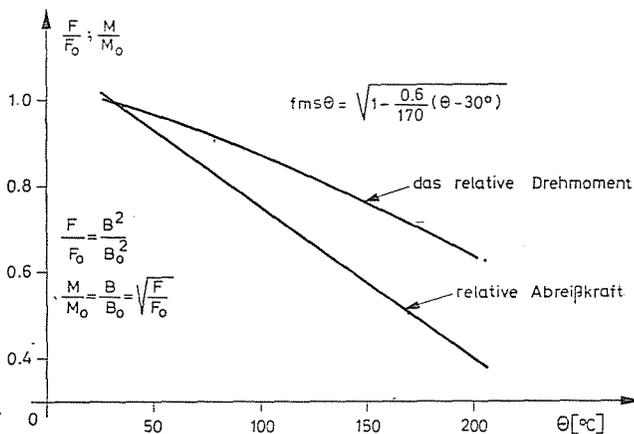


Abb. 4

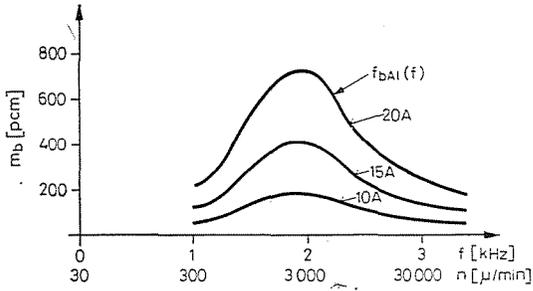


Abb. 5

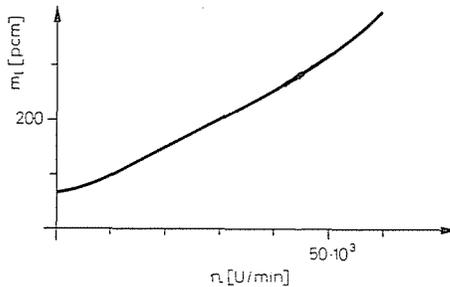


Abb. 6

ratur für verschiedene Ständerströme. Die zu einem Strom  $I = 20$  A gehörende Kurve sei durch  $f_{bAl}(f)$  bezeichnet.

Bei Änderung der Läuferferntemperatur ändert sich der spezifische Widerstand und damit auch das Bremsmoment. Die Änderung kann durch Umrechnung der Frequenz [1] einfach berücksichtigt werden:

$$f_{bAl}(\theta, f) = f_{bAl}(f/(1 + \alpha_{20}(\theta - 30))) \quad (3)$$

wobei  $\alpha_{20}$  der Temperaturkoeffizient des Widerstandes der angewandten Al-Scheibe ist.

Das Bremsmoment der Al-Scheibe kann schließlich in der folgenden Form geschrieben werden:

$$m_b = (I/20)^2 \cdot f_{bAl}(f/(1 + \alpha_{20}(\theta - 20))). \quad (4)$$

c) Die Bestimmung des Bremsmomentes  $m_l = m_l(f)$ :

Das durch Reibungs- und Eisenverluste verursachte Bremsmoment kann am einfachsten durch Auslaufmessungen bestimmt werden, wenn die Trägheit des Systems bekannt ist. Abb. 6 zeigt die Kennlinie, die mit gu-

ter Näherung durch die folgende mathematische Formel angegeben wird:

$$m_i(f) = k_3 + k_4 \cdot f + k_5 \cdot f^{k_5}. \quad (5)$$

#### 4. Die Bestimmung der Läufertemperatur

Wegen der großen Stromdichte (25–30 A/mm<sup>2</sup>) hat der Ständer des Motors ein Wasserkühlsystem. Damit ist seine Temperatur während des Startes mehr oder weniger festgelegt und viel niedriger als die Läufertemperatur. Durch das gegenlaufende Feld der einphasigen Ausführung entstehen im Läufer große Verluste. Die Wärme wird über die Lager, durch Wärmeabstrahlung und Konvektion abgeführt. In der Wirklichkeit ist die Temperaturverteilung im Läufer inhomogen und ihre Bestimmung wäre sehr kompliziert. Die Aufgabe ist noch komplizierter, wenn man berücksichtigt, daß sich der Läufer im Halbvakuum mit einer Umfangsgeschwindigkeit nahe der Schallgeschwindigkeit dreht. Um die Rechenarbeit einzuschränken, ist man gezwungen, die ziemlich grobe Näherung anzuwenden, daß der Läufer während des Anlaufs nur durch den Verlust des gegenlaufenden Feldes geheizt sei und keine Wärmeabführung erfolgt. Diese Annahme ist dadurch gerechtfertigt, daß der Ständerstrom während des Anlaufs 2,5–3-mal größer als in stationärem Zustand ist. So wird die entwickelte Wärme 6 bis 9-mal größer sein. Das Kühlsystem des Läufers ist aber nur auf die Wärmemenge des stationären Zustandes bemessen. Durch die angewandten Näherungen war es zwar nicht möglich, den Start des Motors vollkommen zu simulieren, aber nach den Versuchen ergab sich, daß man mit den Vernachlässigungen auf der sicheren Seite ist. Demgegenüber erhält man die qualitativen Zusammenhänge in befriedigender Weise, d. h. die Wirkung der Änderung von  $I(t)$  während des Anlaufs kann gut untersucht werden.

Bei den angewandten Näherungen läßt sich die Läufertemperatur während des Anlaufens folgenderweise schreiben [1]:

$$\Theta = k_7 \int_0^t (I(t)/20)^2 \cdot f(t) \cdot f_{bAl}(f(t)/(1 + \alpha_{20}(\Theta(t) - 20))) dt + \Theta_0. \quad (6)$$

#### 5. Die Bestimmung der zur kürzesten Startzeit gehörenden Stromform $I(t)$

Auf Grund der aufgeschriebenen Gleichungen kann der Motor während des Startes durch das folgende Differentialgleichungssystem gekennzeichnet werden:

$$\begin{aligned} \frac{df}{dt} &= (m_s(I, \Theta) - m_b(f, I, \Theta) - m_i(f)) \cdot k_8 \\ \frac{d\Theta}{dt} &= k_7 \cdot ((I/20)^2 \cdot f \cdot f_{bAl}(f/(1 + \alpha_{20}(\Theta - 20)))) \cdot k_9 \end{aligned} \quad (7)$$

wobei durch  $k_s$  die Trägheit des Systems und durch  $k_g$  die Masse und die spezifische Wärme des Läufers berücksichtigt werden.

In den Gl. (7) sind  $f(t)$  und  $\Theta(t)$  die Zustandsvariablen,  $I(t)$  die Steuergröße des Systems.

Die Bestimmung der Stromform, die die kürzeste Startzeit sichert, ist eigentlich eine Variationsrechnungsaufgabe mit Nebenbedingungen. Da aber das Gleichungssystem (7) stark nichtlinear ist, könnte die Aufgabe in dieser Form selbst mit Hilfe eines Rechenautomaten nur schwer gelöst werden.

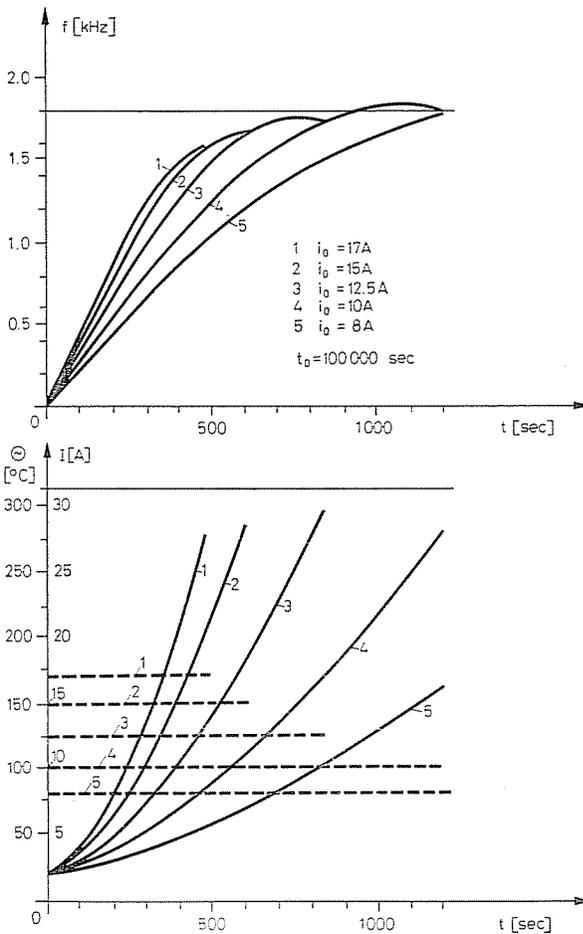


Abb. 7

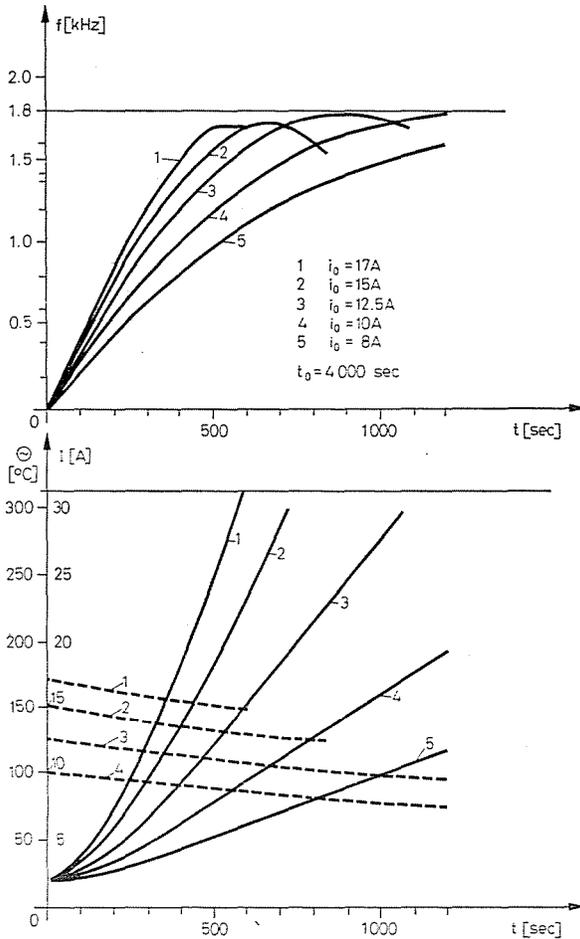


Abb. 8

Statt der genauen Berechnung der die optimalen Startzeit gewährleistenden Funktion  $I(t)$ , wurde das Verhalten des Systems unter Annahme verschiedener  $I(t)$ -Funktionen durch Integration der Gleichungen (7) untersucht und die geeignete  $I(t)$ -Funktion durch Vergleich der Ergebnisse ausgewählt.

Bei den Untersuchungen wurden Ströme der Form  $I(t) = I_0 \cdot e^{-t/t_0}$  angenommen. Die Abb. 7, 8, 9 und 10 zeigen die Ergebnisse. Nach den Abbildungen ist jener Stromablauf der beste, bei dem der Statorstrom mit der Zeit zunimmt. Es ist merkwürdig, daß es auch bei Beschleunigung mit konstantem Strom vorkommen kann, daß die Drehzahl nach Erreichen einer bestimmten Grenzdrehzahl abzunehmen beginnt. Dies wird durch die reversible Entmagnetisierung infolge der Temperaturzunahme verursacht (Abb. 4).

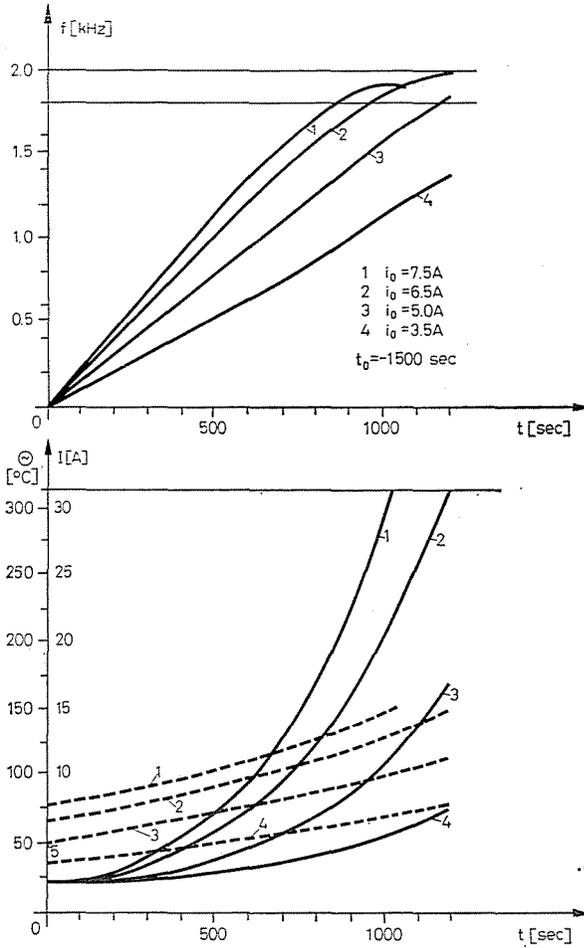


Abb. 9

Aus Abb. 7 läßt sich auch feststellen, daß man bei Beschleunigung mit konstantem Strom einen Grenzstrom finden kann, bei dem der Motor zeitoptimal anläuft.

Die Abb. 7, 8, 9, 10 enthalten die Ergebnisse von Untersuchungen, wo es noch nicht berücksichtigt wurde, daß die Permanentmagnete bei Überschreiten eines gegebenen Stromes irreversibel entmagnetisiert werden. Der zulässige Grenzstrom wurde durch Versuche bestimmt. Abb. 11 zeigt die der Remanenz proportionale Abreißkraft (gemessen an einem weichmagnetischen Stoffe), nach dem Aussetzen des Entmagnetisierungsimpulses. Die Messung wurde bei 30 °C Umgebungstemperatur durchgeführt. Der zulässige Strom ist

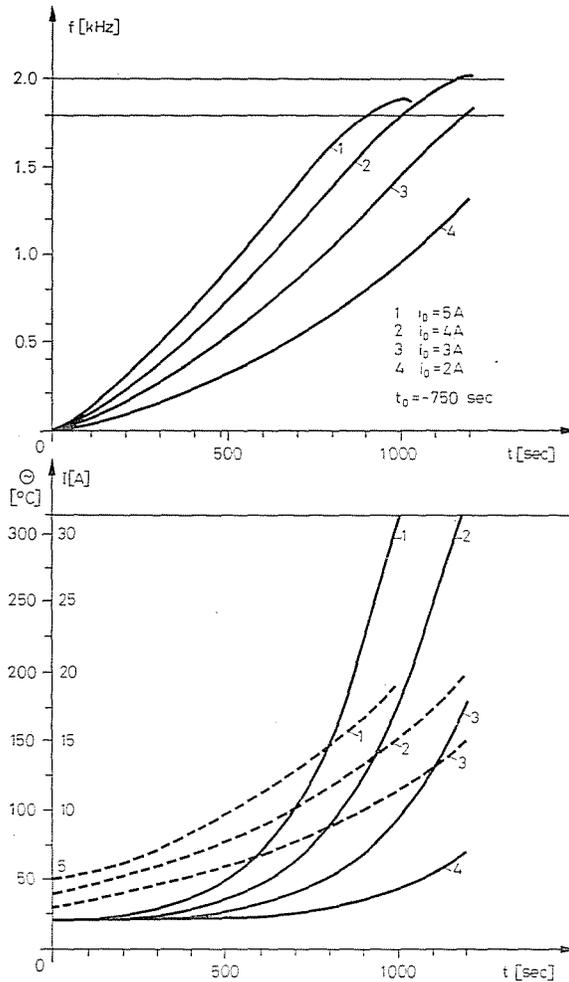


Abb. 10

temperaturabhängig. Nach den Messungen soll sein Wert dem in Abb. 4 gezeigten Verhältnis entsprechend begrenzt werden. Die Untersuchungen wurden auch unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Ständerstrombegrenzung durchgeführt. Die Abb. 12, 13 zeigen die Ergebnisse. Obwohl die Wirkung abnimmt, ist es auch hier vorteilhafter, zu Beginn des Startes einen zunehmenden Strom anzuwenden. Die Verringerung ist wegen der Temperaturzunahme notwendig.

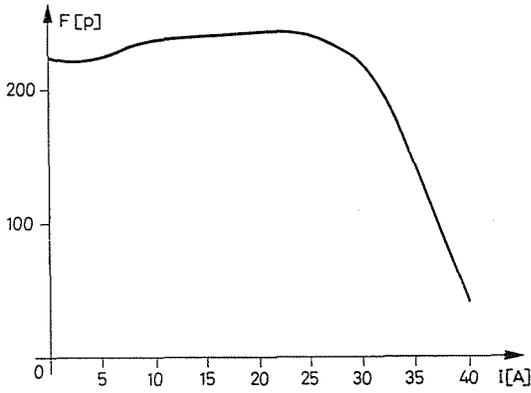


Abb. 11

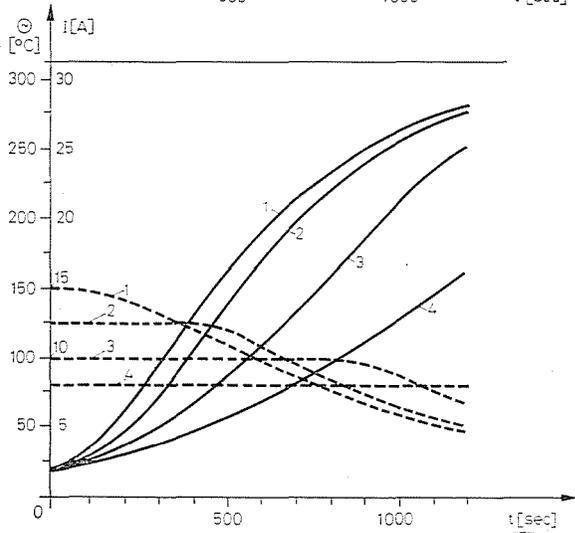
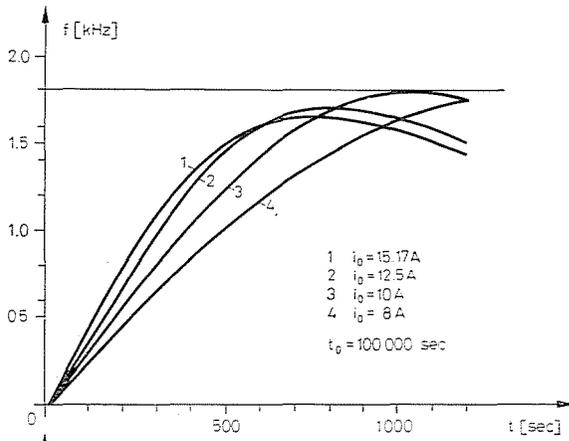


Abb. 12

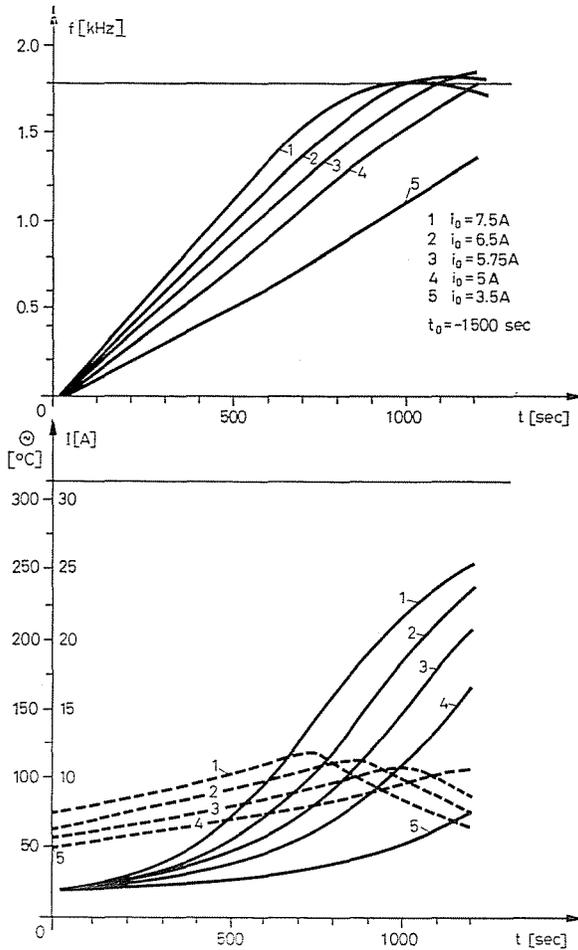


Abb. 13

## 6. Schlussfolgerungen

Die mit Digitalrechner durchgeführte Simulation zeigte, daß es am zweckmäßigsten ist, beim Start des untersuchten UZF-Antriebes eine Ständerstrom-Zeitfunktion anzuwenden, die anfangs zunimmt; später soll der Strom wegen der ansteigenden Läufer-temperatur begrenzt werden. Auf Grund der Simulationsergebnisse können der Anfangswert des Stromes, seine Anstiegsgeschwindigkeit, der Spitzenwert und die Geschwindigkeit der Verringerung annähernd bestimmt werden. Aus den Ergebnissen ist auch festzustellen, daß sich nicht viel ungünstigere Verhältnisse ergeben, wenn der Start mit konstantem Strom geschieht. In diesem Falle wird der Stromsollwertgeber einfacher sein.

### Zusammenfassung

Der Aufsatz beschäftigt sich mit den Startverhältnissen eines einphasigen UZF-Antriebes mit permanentmagneterregtem Synchronmotor. Es werden die auf den Läufer wirkenden Kräfte bestimmt und die Bewegungsgleichung des Systems wird durch ein Näherungs-Wärme-modell ergänzt. Dann wird der Startvorgang durch digitale Simulation untersucht. Auf Grund der Ergebnisse kann die annähernd optimale Startstrom-Zeitfunktion ausgewählt werden.

### Literatur

1. KÁRPÁTI, A.: Grundlagen für die theoretische und rechnerische Untersuchung einer Synchronmaschine mit Permanentmagneten für große Drehzahlen. Elektrotechnik und Maschinenbau, 1972 89. Jahrgang, Heft 5.

Dr. Attila KÁRPÁTI H-1521 Budapest