Ing. B. OPRENDECK
Dr. Ing. I. BABUȚIA

Mathematisch–statistische Gesichtspunkte der Serienprüfung von Asynchronmaschinen

Die mathematisch — statistische Analyse der Serienprüfung von Asynchronmaschinen ermöglicht sowohl die Durchführung einer vergleichenden Beurteilung der verschiedenen in der Literatur vorgeschlagenen Methoden, als auch die Empfehlung auf wissenschaftlicher Grundlage der vom technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkt aus als am meisten entsprechend betrachteten Lösung.

Die Asybchronmaschine stellt den in besonders grossen Serien hergestellten Motor dar. In diesen Fällen schliesst das relativ hohe wirtschaftliche Gewicht der technischen Qualitätsprüfung die Gewährung einer grösseren Beachtung der Wirtschaftlichkeit desselben ein. Die vorliegende Arbeit nimmt eine Analyse der Serienprüfung auf mathematisch-statistischer Grundlage vor und hebt einige verlustbringende Probleme hervor.

Die sich ergebenden Schlussfolgerungen und Vorschläge zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit haben als Grundlage sowohl die theoretische Bearbeitung, als auch die praktische Erfahrung in diesem Bereich des Unternehmens „Electromotor", Timişoara.

Die in unserem Land geltenden Normen bezüglich der elektrischen Maschinen *(GOST 7217-54, STAS 1893-50, VDE usw.)* sehen zwei Arten der industriellen Prüfungen von elektrischen Maschinen vor: Typenprüfungen *) und Kontrollprüfungen**).

*) Die Typenprüfungen stellen die Gesamtheit der verbindlichen Prüfungen dar, die durch die in Frage stehenden Standards vorgeschrieben werden. Diese komplexen Prüfungen werden am Prototyp durchgeführt, periodisch an einer begrenzten Anzahl von Erzeugnissen und, verbindlich, jedesmal wenn eine bedeutendere technologische oder konstruktive Aenderung vorgenommen wird.

**) Kontrollprüfungen sind diejenigen Prüfungen die im Werk an jeder hergestellten Maschine vorgenommen werden.

Die Kontrollprüfungen stellen nur einen Teil der Typenprüfungen dar und haben den Zweck zu untersuchen, ob die Maschine den durch den in Frage kommenden Standard festgelegten Bedingungen entspricht. Im Falle der Massenfertigung, wenn eine grosse Anzahl Maschinen zum Prüfstand kommt, spiegelt sich die Wichtigkeit der technisch-wirtschaftlichen Serienprüfung eindeutig nicht nur in den Selbstkosten wider, sondern stellt ein Schlüsselproblem in der Gewährleistung der Qualität sämtlicher Erzeugnisse dar.

1. DIE PRINZIPIELLE ANALYSE DES WESENS DER SELEKTIVEN SERIENPRÜFUNG

Die technische Serienprüfung hat die Aufgabe, auf Grund der Einzelprüfungen der Maschinen, die hohe Qualität der hergestellten Erzeugnisse zu sichern, aus dem ganzen Maschinenlos die schadhaften Maschinen auszuwählen und die Ursachen hierfür zu erkennen. Die im Standard *STAS 1893-50* für die Serienprüfung von Asynchronmotoren vorgesehenen Prüfungen bestehen aus zwei Klassen:

a) unmittelbare Prüfungen, bei denen die verfolgte normalisierte Grösse direkt gemessen wird;

b) mittelbare Prüfungen, bei denen durch die Messung einiger Grössen verfolgt wird, ob andere die genormten Werte einhalten. So werden vorgesehen: die Leerlaufprüfung (bei der die Leerlaufspannung U_0 ermittelt wird, der Leerlaufstrom I_0 und die aufgenommene Leerlaufleistung P_0) und die Laufprobe bei Kurzschluss (bei der die Kurzschlusspannung U_{sc}, der Kurzschlusstrom I_{sc} und die bei Kurzschluss aufgenommene Leistung P_{sc} gemessen werden). Aber nicht diese Grössen besitzen genormte Werte, sondern die Nennerwärmung θ, der Wirkungsgrad η, der Leistungsfaktor cos φ, der relative Anlaufstrom k_{Ip}, das relative Anlaufdrehmoment k_{Mp}, das maximale (relative) Drehmoment λ, das minimale relative Drehmoment k_{mp}. Folglich muss auf Grund der Messungen der Serienprüfung (U_0, I_0, P_0; U_{sc}, I_{sc}, P_{sc}) abgeleitet werden ob die Nennparameter sich in das genormte Toleranzfeld eingliedern lassen.

Die direkten Prüfungen ergeben sichere und sofortige Schlussfolgerungen und es sind keine besonderen Methoden für die Auslegung der Ergebnisse erforderlich.

Die indirekten Prüfungen unterstreichen, durch ihre Benennung selbst, die Notwendigkeit einer Auslegungsmethode, die die Verbindung zwischen den gemessenen Grössen und den Parametern, deren Verfolgung gewünscht wird, gewährleisten. Wenn wir das konkrete Problem dieser Prüfungen untersuchen, so ergibt sich im Falle der Asynchronmaschinen, vom allgemeinen und prinzipiellen Gesichtspunkt aus betrachtet, dass die Schätzung eines Nennparameters p ($p = \theta, \eta, k_{Ip}, k_{Mp}, cos\ \varphi, \lambda$) gesucht wird, wenn eine Anzahl Werte (U_0, I_0, P_0; U_{sc}, I_{sc}, P_{sc}) bekannt ist, Merkmale mit denen dieser Parameter funktionell verbunden ist. Diese sechs Werte stellen aber nicht die Gesamtheit der Veränderlichen dar von denen dieser Nennpara-

meter abhängt, sondern nur diejenigen die eine Haupteinwirkung aufweisen. Es wird also im Grunde eine funktionelle Verbindung untersucht, die die Form hat:

$$y = f(x_1, x_2, x_3 \ldots \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3), \tag{1}$$

wo die Funktion y den verfolgten Nennparameter darstellt, x_1, x_2, x_3, die bekannten Veränderlichen, und $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \ldots$ die Veränderlichen die einen aleatorischen Charakter aufweisen, nicht bekannt sind (bzw. experimentell unbestimmt im Rahmen der Serienprüfung sind) und eine nebensächliche Rolle haben. Wenn wir die bekannten Veränderlichen, entsprechend zusammengestellt, mit der Bezeichnung $C = Kriterium\ notieren$:

$$c = f_2(x_1, x_2, x_3), \tag{2}$$

ergibt sich, dass letzten Endes, vom mathematischen Gesichtspunkt aus, die Werte der Funktion $y(y = \theta, \eta, k_{Ip}, k_{Mp}, cos\ \varphi, \lambda)$ untersucht werden, die nur auf Grund des Merkmals $c[c = f(U_0, I_0, P_0; U_{sc}, I_{sc}, P_{sc})]$ ermittelt worden sind und die nur die Veränderlichen mit Haupteinflüssen zusammenfassen. Eine derartige Abhängigkeit bei der die Verbindung nicht rein funktionell ist, sondern bei welcher unbekannte, aleatorische Veränderliche eintreten und die bewirken, dass bei einem gegebenen und konstanten Wert der Kriterien die Funktion unendlich viele, nach einem statistischen Gesetz der Verteilung gruppierte Werte annimmt, wird eine stochastische Abhängigkeit genannt *(8, 11, 14)*. Im Grunde genommen stellt letzten Endes jede technische Messung einen stochastischen Vorgang dar *(6, 8)*. Dieser Charakter ist im Rahmen der indirekten Messungen grundlegend, wobei die aleatorischen Veränderlichen, die experimentell nicht geschätzt wurden, ein grosses Gewicht darstellen.

Folglich ist die Verbindung zwischen dem verfolgten Nennparameter (Funktion) und den Daten der Serienprüfung (Kriterium = Argument) von prägnant stochastischer Natur und die Abhängigkeit besitzt einen statistischen Charakter.

Die Serienprüfung verläuft also vom prinzipiellen Gesichtspunkt aus nach dem folgenden mathematischen Schema (in dem der analytische Ausdruck der Funktion $F_{stoch}(c)$ unbekannt ist):

$$\begin{aligned} p &= F_{stoch}(c) \\ p &= (\theta, \eta, k_{Ip}, k_{Mp}, cos\ \varphi, \lambda) \\ c &= f(U_0, I_0, P_0; U_{sc}, I_{sc}, P_{sc}) \end{aligned} \tag{3}$$

Die graphische Darstellung einer solchen Funktion wird in *Abb. 1* gezeigt. Gegenüber einer normalen funktionellen Verbindung, in der eine Funktion der Form $y = f(c)$ als Kurve in der Ebene der Koordinatenachsen erscheint, wird die stochastische Abhängigkeit durch einen Zuordnungsbereich dargestellt.

Die graphische Darstellung wird durch die Tatsache gekennzeichnet, dass sie die sogenannte Regressionskurve *(a, a')* enthält, die den höchsten wahrscheinlichen Wert (Modul) des Parameters für ein gegebenes Kriterium darstellt. Wenn wir uns von der Regressionskurve entfernen, sinkt die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins eines Wertes des Parameters für das

gleiche Kriterium nach einer statistischen Verteilungskurve *(Abb. 1 d)*. Die Grenzen des Bereiches ausserhalb dessen, mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit, kein Parameter von einem mit dem Kriterium übereinstimmen den Wert besteht, werden die Grenzen der Zuordnungszone genannt. In diesem Sinne besteht eine untere Grenze *(b, b')* und eine obere Grenze *(c, c')* der Zuordnungszone (gemäss *Abb. 1*).

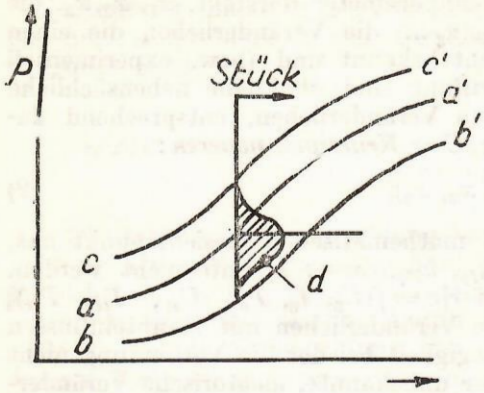

Abb. 1: Die stochastische Abhängigkeit zwischen Parameter und Kriterium

Für den Fall der vorliegenden Arbeit können noch weitere genauere Angaben für die technische Serienprüfung, neben diesen prinzipiellen, allgemeingültigen Bemerkungen gemacht werden. So hat eine Untersuchung *(4)*, die auf über 20 000 Asynchronmotore verschiedener Typen (annähernd 100 Typen) erweitert wurde, gezeigt, dass die statistische Verteilungskurve der verschiedenen Parameter einem normalen Gesetz folgt (Gauss-Laplace). Wenn wir desgleichen in Betracht ziehen, dass im Rahmen eines Fabrikationsloses die Verstreuung der Parameter relativ klein ist, in der Grössenordnung einiger Prozente, geht die Regressionskurve in eine Regressionsgerade über *(Abb. 2)*.

Hier stellt *a a'* die Regressionsgerade dar, während *b b'* und *c c'* die Begrenzungsgeraden der Zuordnungszone sind.

Auf Grund des Bestehens dieser stochastischen Verbindung zwischen dem Parameter und den Daten der Serienprüfung, kann prinzipiell das Problem der Ermittlung einer Prüfungsgrenze L_c gelöst werden für ein Kriterium das durch die sechs Werte (U_0, I_0, P_0; U_{sc}, I_{sc}, P_{sc}) gebildet wird und das der standardisierten Prüfungsgrenze L_p des Kriteriums entsprechen soll. Wenn wir die selektive Rolle der Prüfung in Betracht ziehen, da im Rahmen der Serienprüfungen eine Untersuchung jedes einzelnen Exemplars des Erzeugnisses durchgeführt wird, so wird die Ermittlung der Prüfungsgrenze des Kriteriums gefordert, dem mit höchster Wahrscheinlichkeit die durch die für den in Frage stehenden Parameter durch die Norm festgelegte Grenze entspricht. Auf Grund der Regressionsgeraden *(Abb. 2)* kann folglich die Prüfungsgrenze L_c des Kriteriums festgelegt werden, dem mit höchster Wahrscheinlichkeit die standardisierte Prüfungsgrenze L_p des Parameters entspricht. Wegen der stochastischen Abhängigkeit, genau wie im allgemeinen Fall einer statistischen Berechnung, werden die Schlussfolgerungen durch eine bestimmte Prüfungswahrscheinlichkeit gekennzeichnet. Deshalb wird auch das Problem einer falschen Behauptung gestellt. So erscheint das Risiko des Lieferanten q_I (oder Risiko ersten Grades) tatsächlich gute Motore zurückzuweisen und das Risiko des Kunden q_{II} nichtentsprechende Motore zu übernehmen. Falls der untersuchte Parameter (k_{Mp}, $\cos\varphi$, λ). beispielsweise eine untere Prüfungsgrenze L_p besitzt, werden die Motore mit kleinen Werten des Parameters als nichtentsprechend betrachtet *(Abb. 2)*

Auf Grund der Regressionsgeraden erhält man in diesem Fall die untere Prüfungsgrenze des Kriteriums dem mit höchster Wahrscheinlichkeit wertmässig die Grenze des Parameters L_c entspricht. Im Falle einer direkt proportionalen Abhängigkeit ergibt sich also, dass Motore die ein Kriterium c, $c = f(U_0, I_0, P_0; U_{sc}, I_{sc}, P_{sc})$, kleiner als L_c besitzen, als nichtentsprechend betrachtet werden müssen.

Aus *Abb. 2* (für Motore mit dem Parameter gleich der Grenze $p = L_p$) ist ersichtlich, dass in diesem Fall das Risiko des Lieferanten q_I (*Abschnitt* $\bar{A}\bar{C}$) gleich dem Risiko des Kunden q_{II} (*Abschnitt* $\bar{A}\bar{F}$) ist. Dieser Fall wird für den praktischen Gebrauch jeder statistischen Prüfung durch die Literatur empfohlen *(14 S. 192)* wegen der Angemessenheit des Risikos zwischen Kunden und Lieferanten.

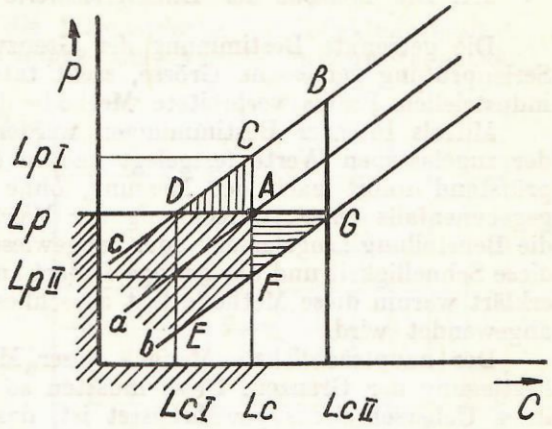

Abb. 2: Bestimmung der Prüfungsgrenzen für ein Kriterium mit unterer Grenze im Falle einer liniaren Zuordnung L_{Ic}, entsprechend $q_I = 0$, und L_{cII} entsprechend $q_{II} = 0$
$I_p/I_n = f\ (I_{sc})$

Im vorliegenden Falle erscheint der Vorteil, dass je Einzelerzeugnis (bei Beurteilung eines einzigen Motors) die Schlussfolgerungen auch die höchste Prüfungswahrscheinlichkeit besitzen. Es ist zu beachten, dass das Risiko des Lieferanten praktisch gleich Null ist für den Wert L_{cI}, der auf Grund der oberen Grenze der Zuordnungszone ermittelt wurde. Für diesen Fall ist aber das Risiko des Kunden am höchstern. Umgekehrt, für den Wert L_{cII}, der auf Grund der unteren Grenze ermittelt wurde, ist das Risiko des Kunden praktisch gleich Null $q_{II} = 0$, das Risiko des Lieferanten ist aber jetzt am höchsten. Bei einer Prüfung auf Grund eines Grenzkriteriums, das im allgemeinen zwischen L_{cI} und L_{cII} angenommen wird, ergibt sich das Risiko des Lieferanten und des Kunden aus der sogenannten Wirksamkeitskurve *(14)*.

Diese, für jede technische Prüfung die sich auf experimentelle und wesentliche Messungen bei einer ausgeprägt indirekten Prüfung mit stochastischem Charakter begründet, allgemeingültigen Probleme müssen bei der Analyse und der Bewertung der Auslegungsmethoden für die Daten der Serienprüfung von Asynchronmaschinen in Betracht gezogen werden.

2. DARLEGUNG UND ANALYSE DER BEKANNTEN METHODEN IHRE UEBERPRÜFUNG IN DER BETRIEBLICHEN PRAXIS

Für die Auslegung der Messungen der Serienprüfung von Asynchronmaschinen gibt die Literatur prinzipiell drei grundsätzlich verschiedene Methoden an:

— die Methode der Einzelgrenzwerte;

— die Methode der Grenzwerte in Abhängigkeit von zwei Messungen der Serienprüfung;
— die Methode der Auslegung auf Grund komplexer Prüfungskriterien.
Im Folgenden wird jede Methode ausführlich dargelegt.

2.1. *Die Methode der Einzelgrenzwerte*

Die getrennte Bestimmung der Grenzwerte für jede einzelne, bei der Serienprüfung gemessene Grösse, stellt tatsächlich die am meisten in der industriellen Praxis verbreitete Methode dar.

Mittels interner Bestimmungen werden für jede Grösse die Grenzen der zugelassenen Werte festgelegt und in dieser Weise kann beim Serienprüfstand sofort nach der Messung, ohne weitere Arbeitsleistung, ausser gegebenenfalls einer Umrechnung der Werte für die genormte Spannung, die Beurteilung „zugelassen" oder „abgewiesen" vorgenommen werden. Eben diese Schnelligkeit und der geringe Bedarf an Arbeitsleistung und Befähigung erklärt warum diese Methode fast ausschliesslich in der industriellen Praxis angewendet wird.

Der hauptsächlichste Mangel dieser Methode besteht in der Art der Festlegung der Grenzen. Diese müssten so gewählt werden, dass im Falle ihres Ueberschreitens gewährleistet ist, dass auch die Nennparameter die genormten Grenzen überschreiten. Um diesen Wunsch verwirklichen zu können, werden die Grenzen praktisch auf Grund von zwei bis drei Typenprüfungen durch die Gegenüberstellung der Nennparameter und der sechs Werte festgelegt.

Bei einer oberflächlichen Analyse scheint es, dass wenigstens für den Prüfkurzschlusstrom I_{sc} die Grenzen leicht festgelegt werden können, so dass der Wert des Anlaufstromes I_p im Rahmen des zugelassenen Veränderungsbereichs verbleibt.

Da in diesem Fall der gleiche Strom, nur bei verschiedenen Spannungen, gemessen wird, ist die Abhängigkeit theoretisch liniar:

$$I_p = I_{sc}(U_n/U_{sc}) = k\, I_{sc} \qquad (4)$$

oder, wenn die Sättigung in Betracht gezogen wird, ist sie wenigstens rein funktionell:

$$I_p = f(I_{sc}) \qquad (5)$$

und folglich scheint es, dass, wenn nicht durch Berechnung (*4*), dann wenigstens graphisch (nach *5*) die zugelassenen Grenzen für I_{sc} ermittelt werden können.

Bei einer gründlicheren Analyse ergibt sich aber auch im vorliegenden Falle — der einfachstmögliche — dass das Problem nicht gerade so einfach ist. In *Abb. 3* wird die Abhängigkeit des relativen Anlaufstromes in Funktion vom Prüfungskurzschlusstrom wiedergegeben. Daraus geht hervor, dass die absolut normale technologische Streuung der Werte keine genaue und eindeutige Ermittlung der für I_{sc} zugelassenen Grenze erlaubt, damit I_p/I_n gleich oder unter dem Werte von 5,8 bleibt. Auf diese Weise wird der stochastische Charakter der Abhängigkeit, selbst in diesem Falle, der der einfachstmögliche ist, hervorgehoben.

Komplizierter ist die Untersuchung der übrigen normalisierten Parameter η_n, θ_n, $cos\ \varphi_n$, k_{mp} *und* λ, mittels der Serienprüfungen. Werden die bekannten theoretischen Ausdrücke dieser Grössen angeführt, so erhalten wir:

— den Wirkungsgrad:

$$\eta_n = P_2/(P_2 + \Sigma_p) \qquad (6)$$

wo die Summe der Verluste Σ_p die Eisenverluste, die Wicklungsverluste, die zusätzlichen Verluste, die Reibungs- und Ventilationsverluste enthält, während P_2 die Nutzleistung des Motors darstellt;

— die Erwärmung θ_n, die in allgemeiner Form geschrieben werden kann:

$$\theta_n = f\ (\Sigma_p/R_\theta) \qquad (7)$$

wobei Σ_p die Verluste darstellt, und R_θ die gleichwertigen thermischen Widerstände;

— den Leistungsfaktor cos φ_n, der als ein Teil des höchsten Leistungsfaktors ausgedrückt werden kann:

$$cos\ \varphi_n = k\ cos\ \varphi_{max} = k\ (I_{ki} - I_\mu)/(I_{ki} + I_\mu) \qquad (8)$$

worin

I_{ki} = der ideale Kurzschlusstrom

I_μ = der Magnetisierungsstrom sind;

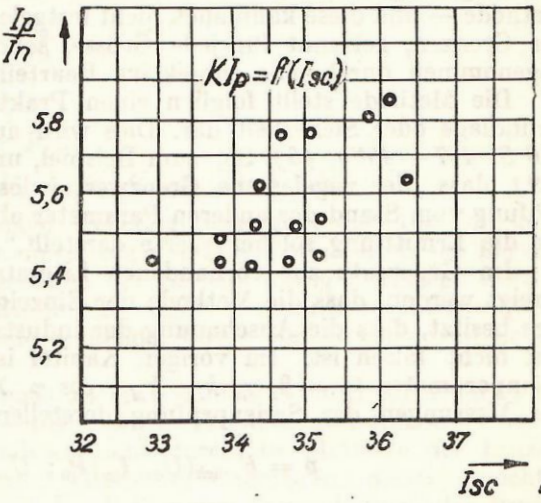

Abb. 3: Der relative Anlaufstrom I_p/I_n (bei 380 V) in Abhängigkeit des Prüfkurzschlusstromes I_{sc} (bei 110 V) für 15 Induktionsmaschinen im Rahmen des gleichen Fabrikationsloses(14 kW, 1500 U/Min).

— das relative Anlaufdrehmoment k_{Mp}, ungefähr zu:

$$k_{Mp} = M_p/M_n = p_{cu2}/P_n \qquad (9)$$

worin

M_p = das Anlaufdrehmoment
M_n = das Nennmoment
p_{cu} = die Rotorwicklungsverluste
P_n = die Nennleistung des Motors sind;

— das relative maximale Drehmoment, das geschrieben werden kann:

$$\lambda = M_{max}/M_n = (I_{ki} - I_\mu)/2I_n\ \cos\ \varphi_n \qquad (10)$$

worin

M_{max} = das maximale Drehmoment
I_n = der Nennstrom
$\cos\varphi_n$ = der Nennleistungsfaktor sind.

Wenn wir die Ausdrücke (6—10) betrachten, dann beobachten wir, dass selbst vom theoretischen Gesichtspunkt aus die Nennparameter gleichzeitig nicht nur von den sechs bei der Serienprüfung gemessenen Grössen abhängen, sondern auch von einer Reihe bei der Serienprüfung nicht geschätzten Grössen. Folglich geht klar hervor, dass es unmöglich ist einen zulässigen Grenzwert festzulegen, getrennt für jede bei der Serienprüfung gemessene Grösse, auf Grund des Bekanntseins des zulässigen Grenzwertes der Nennparameter.

Folglich gibt es keine noch so einfache und rudimentäre Berechnungsmethode — und diese kann auch nicht festgelegt werden — für die Ermittlung der Grenzen, getrennt für jede Grösse, sondern sie werden rein empirisch angenommen durch eine subjektive Beurteilung *(10 S. 407—408)*.

Die Methode stellt folglich einen Praktizismus ohne wissenschaftliche Grundlage oder Sicherheit dar. Dies wird auch in der Literatur angeführt *(10 S. 407—408)*, *(5)*. So, zum Beispiel, unterstreicht G. K. Jerve *(10 S. 409)*, dass „der zugelassene Grenzwert jedes Parameters bei der Kontrollprüfung vom Stand der anderen Parameter abhängt, was ein Haupthindernis für die Ermittlung solcher Werte darstellt."

Im Gegensatz zur vorhandenen Literatur *(3, 10, 12)* kann trotzdem gezeigt werden, dass die Methode der Einzelgrenzwerte eine korrekte Grundlage besitzt, dass die Anschauung der industriellen Praxis in ihrer Gesamtheit nicht falsch ist. Im vorigen Kapitel ist festgesetzt worden, dass die Nennparameter ($p = \theta,\ \eta,\ k_{ip},\ k_{Mp},\ cos\ \varphi,\ \lambda$) eine stochastische Funktion der Messungen der Serienprüfung derstellen:

$$p = F_{stoch}(U_0,\ I_0,\ P_0;\ U_{sc},\ I_{sc},\ P_{sc}) \tag{11}$$

Der Nennparameter p wird durch die Standards begrenzt (obere oder untere Grenze). Wird zum Beispiel angenommen, dass der Parameter eine untere Grenze hat, ergibt sich als Bedingung für einen entsprechenden Motor:

$$p \geqslant L_p \tag{12}$$

Im Falle einer stochastischen Funktion werden aber immer, bei einer konstanten Wahrscheinlichkeit P

$$P = P\ (p \geqslant L_p), \tag{13}$$

eigene Werte für das Argument gefunden, so dass die Beziehung bestätigt wird. Das heisst:

$$\begin{cases} U_{0_i} < U_0 < U_{0_s} \\ I_{0_i} < I_0 < I_{0_s} \\ P_{0_i} < P_0 < P_{0_s} \\ U_{sc_i} < U_{sc} < U_{sc_s} \\ I_{sc_i} < I_{sc} < I_{sc_s} \\ P_{sc_i} < P_{sc} < P_{sc_s} \\ p = F_{stoch}\,(U_0,\ I_0,\ P_0,\ U_{sc},\ I_{sc},\ P_{sc}) \geqslant L_p \end{cases} \tag{14}$$

Wird das Problem umgekehrt gestellt, dann ergibt sich, dass immer eigene Werte der Argumente gefunden werden, die mit dem Index' bezeichnet sind, für die die Ungleichung nicht befriedigt ist und für die, mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit P, folglich der Motor den Bedingungen nicht entspricht, da der Nennparameter kleiner als die zugelassene Grenze ist:

$$\begin{cases} P = P(p < L_p) \\ U'_{0_i} < U_0 < U'_{0_s} \\ I'_{0_i} < I_0 < I'_{0_s} \\ P'_{0_i} < P_0 < P'_{0_s} \\ U'_{sc_i} < U_{sc} < U'_{sc_s} \\ I'_{sc_i} < I_{sc} < I'_{sc_s} \\ P'_{sc_i} < P_{sc} < P'_{sc_s} \\ p = F_{stoch}(U_0, I_0, P_0, U_{sc}, I_{sc}, P_{sc}) < L_p \end{cases} \tag{15}$$

Auf Grund dieser prinzipiellen Ueberlegungen geht also für den konkreten Fall der technischen Serienprüfung von Asynchronmaschinen hervor, dass Einzelgrenzen für die Messungen der Serienprüfung festgelegt werden können, so dass sich bei ihrer Einhaltung ergibt (mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit), dass der in Rede stehende Motor den Normen entspricht *(Beziehung 14)*.

Die Motore, die diese Grenzen nicht beachten, können aber nicht als nichtentsprechend bezeichnet werden. Diese Tatsache gibt nur an, dass in dem betreffenden Fall ihre Qualität nicht durch die Methode der Einzelgrenzwerte ermittelt werden kann. Grade im Uebersehen dieses Gesichtspunktes besteht einer der prinzipiellen Fehler der Anwendung in der Praxis der Methode der Einzelgrenzwerte, da angenommen wird, dass die Möglichkeit ihrer Ermittlung besteht, so dass ihre Einhaltung mit Sicherheit die gute Qualität des Motors angibt, während die Nichteinhaltung mit Gewissheit die Nichtübereinstimmung desselben mit den in Frage stehenden Normen anzeigt.

Daraus geht desgleichen hervor *(Beziehung 15)*, dass Einzelgrenzwerte für die Messungen der Serienprüfung festgelegt werden können, so dass bei ihrer Einhaltung sich, mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit, ergibt, dass der Motor den Normen nicht entspricht.

Wir unterstreichen die Wichtigkeit der richtigen und wissenschaftlichen Ermittlung dieser Grenzwerte. Das Wesen dieses Problemes fordert aber unvermeidlicherweise ihre Berechnung auf probabilistischer und statistischer Grundlage, eine Berechnung die sich auf eine möglichst grosse Anzahl Typenprüfungen stützen muss, die am Modell, an der Nullserie und an der laufenden Serie durchgeführt werden.

Die Gesamtheit der hergestellten Maschinen wird also in drei Klassen eingeteilt:

— diejenigen, die sich in die Grenzwerte, gemäss Gleichung 14, einreihen lassen und die den Normen (mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit) entsprechen;

— diejenigen, die sich gemäss Gleichung 15 in die Grenzwerte einreihen lassen und die den Normen (mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit) nicht entsprechen;

— diejenigen, die sich in die Grenzwerte gemäss Gleichung 14 und 15 nicht einreihen lassen und folglich nicht mit der Methode der Einzelgrenzwerte geprüft werden können.

Da diese jedoch grade Motore sind deren Parameter sich der Toleranzgrenze nähern, stellt die Unmöglichkeit ihrer Prüfung den Hauptmangel der Methode der Einzelgrenzwerte dar.

Die experimetellen Ueberprüfungen der Methode (*13*) haben die Richtigkeit dieser Schlussfolgerungen unterstrichen. Als mittels Typenprüfungen 206 auf Grund der Methode der Einzelgrenzwerte abgewiesene Asynchronmotore überprüft wurden, ging hervor, dass diese Beurteilung bei 140 Motoren (70%) falsch war, nur 66 (30%) derselben entsprachen tatsächlich nicht. Es muss aber unterstrichen werden, dass die massiven fehlerhaften Abweisungen nicht der willkürlichen und fehlerhaften Annahme der Grenzwerte zuzuschreiben ist. Der Beweis ist, dass annähernd 30% der abgewiesenen Maschinen, des in Frage stehenden Loses, tatsächlich nicht entsprechen. Ein anderer Beweis in diesem Sinne ist die Tatsache, dass entsprechende Maschinen vorhanden sind, obwohl sie keine der Prüfungsgrenzen einhalten, und nichtentsprechende Maschinen, obwohl sie eine der Prüfungsgrenzen nur wenig überschreiten. Folglich bestätigen die Versuche die theoretisch abgeleitete Tatsache, dass die Methode einen begrenzten Anwendungsbereich besitzt.

Das Uebersehen des stochastischen Charakters zwischen den Parametern (Funktion) und den Daten der Serienprüfung hat dazu beigetragen, dass die Industrie praktisch um eine Berechnungsmethode für diese Grenzwerte gebracht worden ist, welche letzten Endes empirisch und mehr willkürlich zugelassen wurden. Die Benützung dieser empirisch festgesetzten Grenzwerte für die Scheidung sämtlicher entsprechenden Motore eines Loses von den nichtentsprechenden (und zwar die Abweisung eines Motors, falls die am Serienprüfstand gemessenen Werte die festgesetzten Grenzen überschreiten, die für entsprechende Motore vorgesehen sind) ist eine völlig falsche industrielle Praxis.

Auf diese Weise wird der Qualitätsbescheinigung des Motors nicht nur ein unsicherer Charakter zugestanden, sondern auch die Produktionsabteilung wird fälschlicherweise durch die Abweisung von tatsächlich entsprechenden Motoren belastet.

2.2. *Die Methode der Grenzwerte in Abhängigkeit von je 2 Messungen der Serienprüfung*

Der sowjetische Forscher O. D. Goldberg hat die prinzipielle Unmöglichkeit der getrennten Festlegung der Grenzwerte für jeden Parameter der Kontrollprüfung erkannt und den Versuch unternommen, Grenzwerte in Abhängigkeit von je zwei Messungen der Serienprüfung festzulegen (*3*), (*4*), (*5*). Die grundlegende Voraussetzung dieser Arbeit besteht in der Annahme, dass die Nennparameter nur durch 2 bei der Serienprüfung gemessene Grössen funktionell verbunden sind und folglich Grenzwerte festgelegt werden können, die für Gruppen von je zwei Parametern zugelassen werden. Diese Voraussetzung ist für die Methode nötig, da nur auf diese Weise die Abhängigkeit zwischen Parameter und Grenzwert durch eine Zone in der Ebene XOY überprüft werden kann.

Es wird also angenommen, dass die Uebereinstimmung zwischen dem gegebenen Motor und den Bedingungen der Standards durch das Konstruiren von drei Prüfzonen festgelegt werden kann:

— die Prüfzone für η, die durch die Ebene $P_0 - P_{sc}$ *(Abb. 4)* dargestellt wird;

— die Prüfzone für $\cos\varphi$ und $k_{I_p} = I_p/I_n$, die durch die Ebene $I_0 - I_{sc}$ *(Abb. 5)* dargestellt wird;

— die Prüfzone für k_{M_p}, die durch die Ebene $I_{sc} - P_{sc}$ *(Abb. 6)* dargestellt wird.

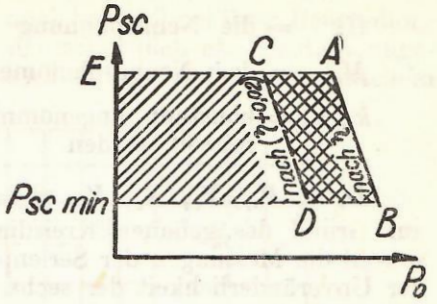

Abb. 4: Die Prüfzone des Wirkungsgrades in der Ebene $P_0 - P_{sc}$

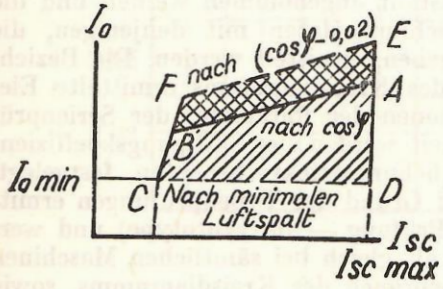

Abb. 5: Die Prüfzone für cos φ und I_p/I_n in der Ebene $I_p - I_{sc}$

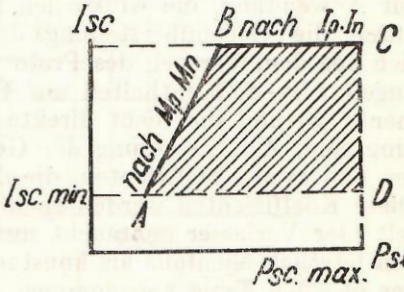

Abb. 6: Die Prüfzone für $k_{M_p} = M_p/M_n$ in der Ebene $I_{sc} - P_{sc}$

Es wird angenommen, dass der Motor den Bedingungen des Standards entspricht wenn keiner der zugeordneten Parameter über die Grenzen dieser Prüfzonen hinausgeht.

Für die Festlegung der Grenzen der Prüfzonen hat der Verfasser versucht, die funktionellen Verbindungen auszudrücken, die zwischen den technisch-wirtschaftlichen Parametern und den Prüfparametern bestehen. Es werden die folgenden Gleichungen angegeben (4):

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + A + P_0 + B + P_{sc}} \tag{16}$$

$$k_{I_p} = \frac{U_n}{U_{sc}} = k_m = \frac{I_{sc}}{I_n} \tag{17}$$

$$k_{M_p} = \left(\frac{U_n}{U_{sc}}\right)^2 \frac{0{,}975}{M_n} \cdot (P_{sc} \cdot k_p - 3\, r_1 \cdot k_m^2 - p_{F_e}) \tag{18}$$

$$\cos\varphi = \frac{Y_c + P_{01}}{\sqrt{(X_c + I'_{0a})^2 + (Y_c + P_{01})^2}} \tag{19}$$

$$\lambda = \frac{D}{C} \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{1}{(CR)^2}}} \tag{20}$$

Die Bedeutung der angewandten Bezeichnungen ist folgende:

P_n = die Nennleistung

U_n = die Nennspannung

M_n = das Nenndrehmoment

k_m, k_p = konstant angenommene Koeffizienten, die experimentell ermittelt werden

D, C, P_{01}, Y_c, X_c, I'_{0a}, $R = f(I_0, P_0, I_{sc}, P_{sc}, \Sigma C)$ = Funktionen, die auf Grund des genauen Kreisdiagramms hervorgehen und als Argument sowohl die Messungen der Serienprüfung als auch die willkürliche Annahme der Unveränderlichkeit der sechs Koeffizienten (ΣC) haben.

In den Formeln *(16—20)* kommt, neben den Angaben der Serienprüfung (U_0, I_0, P_0; U_{sc}, I_{sc}, P_{sc}) noch eine Reihe von Keoffizienten (A, B, k_m, k_p) zur Anwendung, die willkürlich als konstant angenommen werden und die durch die Gegenüberstellung der Berechnungsdaten mit denjenigen, die sich aus dem Versuch des Prototyps ergeben, ermittelt werden. Die Beziehungen *(19—20)* enthalten auf Grund des Kreisdiagramms ermittelte Elemente (3) und die nicht direkte Funktionen der Parameter der Serienprüfung sind. Zur Steigerung der Genauigkeit werden vier Sättigungskoeffizienten und zwei Koeffizienten, die den Stauchungseffekt beachten, festgelegt. Diese Koeffizienten werden ebenfalls auf Grund der Typenprüfungen ermittelt (der Verfasser gebraucht nur eine Prüfung — die Prototype) und werden letztlich ebenfalls als konstant und als gleich bei sämtlichen Maschinen der gleichen Type angenommen. Der Gebrauch des Kreisdiagramms, sowie eine Reihe von Zwischenformeln bedingen eine lange und mühsame Berechnung.

Bei der Erprobung und dem Versuch der Anwendung dieser Methode unter den Bedingungen einer Grosserienfertigung im Rahmen der „Electromotor" — Werke, Timişoara hat sich folgende Lage ergeben:

Bei dem Versuch bei einem Motor von 14 kW, 1500 U/Min festzustellen ob nach Gleichung *(17)* die Prüfungsgrenze für I_{sc} erhalten wird, musste der Faktor k_m aus der Formel ermittelt werden. Aus *Abb 3* ist jedoch ersichtlich, dass bei 15 versuchten Maschinen 15 verschiedene Werte für k_m (mit $\pm$ 5%) erhalten wurden, die gemäss der Methode eigentlich konstante Werte sein müssten.

Die Annahme eines Durchschnittswertes löst dieses Problem nur formell, weil durch die Serienprüfung grade die Einwirkung dieser technologischen Schwankungen auf die Nennparameter verfolgt wird.

Bei dem Wunsch, die zulässige Grenze für die Gruppe $P_0 - P_{sc}$ festzulegen, um den Wirkungsgrad zu überprüfen, ist ebenfalls die experimentelle Ermittlung der Konstanten A und B *(Beziehung 16)* verfolgt worden. Wird der Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Summe $P_0 + P_{sc}$ *(Abb. 7)* dargestellt, dann geht daraus hervor, dass für jede der geprüften 25 Maschinen A und B andere Werte hatten ($\pm$ 2%). Aus dem Bild geht ebenfalls hervor, dass in Wirklichkeit keine funktionelle Abhängigkeit zwischen dem Wirkungsgrad und einem Argument der Form $A + P_0 + BP_{sc}$ beziehungsweise im Grenzfall der Form $P_0 + P_{sc}$, besteht.

Auf Grund eines Erfahrungsaustausches zwischen den Werken „Elektromotor", Timişoara und „Elektroprecizia", Săcele bezüglich der besprochenen Methode ist folgendes bemerkt worden (*13*):

— die Berechnung der Grenzwerte ist unsicher weil bei ihrer Beurteilung eine Reihe von Koeffizienten vorkommt, die willkrülich als konstant angenommen worden sind. Neben einigen derselben, die auf experimentellem

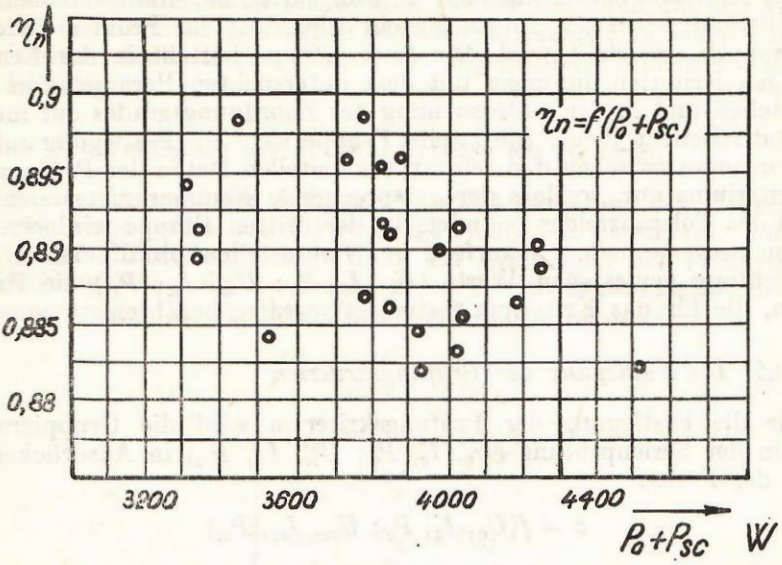

Abb. 7: Die Darstellung des Nennwirkungsgrades η_n in Abhängigkeit der Leerlauf und Kurzschlussverluste für 25 Induktionsmaschinen im Rahmen des gleichen Fabrikationsloses (14 kW, 1500 U/Min).

Weg annährend ermittelt werden können, gibt es andere, die praktisch nicht überprüft werden können und der Konstruktionsberechnung oder dem Kreisdiagramm entnommen werden (zum Beispiel, der Sättigungskoeffizient, der Statorstrom mit Skineffekt und ohne Sättigung, der Statorstrom ohne Skineffekt und ohne Sättigung usw.) (*3*, *4*);

— die Berechnung der Zone $P_0 - P_{sc}$ bedingt die willkürliche Annahme einiger Werte die aber nicht konstant sind. Folglich üben sie eine negative Wirkung auf die Genauigkeit des Diagrammes aus;

— die Untersuchung eines Hauptmerkmals — die Nennerwärmung — kann mittels der angeführten Methodik nicht durchgeführt werden:

— das Problem der Genauigkeit der Behauptungen wird überhaupt nicht gestellt, eine Tatsache die aber für die technische Serienprüfung wesentlich ist. Die willkürliche Annahme der Unveränderlichkeit von sechs Koeffizienten, sowie die Anwendung des Kreisdiagramms (das höhere Harmonische, Skineffekt und zusätzliche Verluste nicht in Betracht zieht) hat als Folge, dass der Fehler grösser ist als die verfolgten technologischen Schwankungen.

Wird das Obenangeführte durchgesehen so ergibt sich als Schlussfolgerung, dass das Uebersehen des stochastischen Charakters einer indirekten Prüfung, letzen Endes, zur Unmögilchkeit einer richtigen Berechnung der Prüfungsgrenzen führt. Diese Tatsache, sowie die grosse Anzahl der will-

kürlich als konstant angenommenen Koeffizienten und der äusserst grosse Umfang der Berechnung haben dazu beigetragen, dass die Methode in die internationale industrielle Praxis nicht eingedrungen ist.

2.3. *Die Methode der komplexen Prüfungskriterien*

Die Methode der komplexen Prüfungskriterien, die prinzipiell in (*16*) und vollständiger in (*17*, *19*) dargestellt wird, löst das Problem indem es in drei Etappen unterteilt wird. Die erste Etappe besteht in der Ermittlung derjenigen Kriterien die enger mit dem untersuchten Parameter in Verbindung stehen und in der Untersuchung des Zuordnungsgrades auf mathematisch-statistischem Wege. Die zweite Etappe sieht die Festlegung auf Grund der Zuordnung zwischen den rein experimentellen Daten der Prüfungsgrenze des Kriteriums vor, so dass der entsprechende Nennparameter sich an der Grenze des Toleranzfeldes befindet. In der dritten Etappe wird eine rasche Untersuchungsmethode entworfen, um festzustellen ob die sechs bei der Serienprüfung gemessenen Werte (U_0, I_0, P_0; U_{sc}, I_{sc}, P_{sc}) die Prüfungsgrenzen, die für das Kriterium festgelegt wurden, beachten.

2.3.1. *Die Festlegung der Prüfungskriterien*

Für die Festlegung der Prüfungskriterien wird die Gruppierung der Angaben der Serienprüfung (U_0, I_0, P_0; U_{sc}, I_{sc}, P_{sc}) in Ausdrücken (Kriterien) der Form:

$$c = f(U_0, I_0, P_0; U_{sc}, I_{sc}, P_{sc}) \tag{21}$$

verfolgt, und zwar möglichst eng mit den Nennparametern $p(p = \theta, \eta, k_{I_p}, k_{M_p}, \cos\varphi, \lambda)$ verbunden. Ausgehend von den funktionellen Beziehungen kommt man zu den folgenden Kriterien:

$$\begin{cases} c_\theta = P_0\left(\frac{U_n}{U_0}\right)^2 + P_{sc}\left(\frac{I_n}{I_{sc}}\right)^2 & (22) \\ c_\eta = P_0\left(\frac{U_n}{U_0}\right)^2 + P_{sc}\left(\frac{I_n}{I_{sc}}\right)^2 & (23) \\ c_{k_{I_p}} = I_{sc}\left(\frac{U_n}{U_{sc}}\right) & (24) \\ c_{k_{M_p}} = P_{sc}\left(\frac{U_n}{U_{sc}}\right)^2 - r_e\left[I_{sc}\left(\frac{U_n}{U_{sc}}\right)\right]^2 & (25) \\ c_\varphi = \dfrac{I_{sc}\left(\frac{U_n}{U_{sc}}\right)}{I_0\left(\frac{U_n}{U_0}\right)} & (26) \\ c_\lambda = \dfrac{I_{sc}\left(\frac{U_n}{U_{sc}}\right)}{I_0\left(\frac{U_n}{U_{sc}}\right)} & (27) \end{cases}$$

worin:

I_1 = der Nennstrom
U_n = die Nennspannung
r_e = der gleichwertige Statorwiderstand sind.

Die abgeleiteten Kriterien enthalten praktisch nur die Daten der Serienprüfung und enthalten nicht die Gesamtheit der Faktoren die den Wert des Nennparameters ermitteln. Folglich ist die Abhängigkeit zwischen Parameter und Kriterium stochastischer Natur, ein allgemeines Problem bei der indirekten Prüfung.

2.3.2. *Die Festlegung der Prüfungsgrenzen der Kriterien*

Nach der Auswahl der Kriterien entsteht die Frage der Ueberprüfung ihres Verbindungsgrades mit den in Frage stehenden Parameter. Auf Grund der festgelegten Zuordnung folgt dann die Ermittlung der Prüfungsgrenze des Kriteriums. Wenn die Ausdrücke der Kriterien bekannt sind, so können die Nennparameter in folgender Form geschrieben werden:

$$\begin{cases} \theta = F_{1\,stoch}(c_\theta) & (28) \\ \eta = F_{2\,stoch}(c_\eta) & (29) \\ k_{I_p} = F_{3\,stoch}(c_{k_{I_p}}) & (30) \\ k_{M_p} = F_{4\,stoch}(c_{k_{M_p}}) & (31) \\ \cos\varphi = F_{5\,stoch}(c_\varphi) & (32) \\ \lambda = F_{6\,stoch}(c_\lambda) & (33) \end{cases}$$

beziehungsweise im allgemeinen

$$p = F_{stoch}(c) \qquad (34)$$

Da von den Typenproben her die zugeordneten Wertepaare P_i, C_i (wobei i die Ordnungsnummer des geprüften Motors darstellt) bekannt sind, wird in erster Reihe die Ueberprüfung der richtigen Auswahl des Kriteriums bzw. des Zuordnungsgrades desselben mit dem in Frage stehenden Parameter verlangt.

Davon ausgehend, dass die Regression praktisch liniar ist (*Abb. 2*), können wir die Formel von Pearson für den Zuordnungsgrad benützen (*1, 6, 8, 11, 14*):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\bar{p} - p_i)(\bar{c} - c_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\bar{p} - p_i)^2 \sum_{i=1}^{n} (\bar{c} - c_i)^2}} \qquad (35)$$

worin

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} p_i\,; \quad \bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} c_i \qquad (36)$$

i = die Ordnungsnummer des den Typenprüfungen unterworfenen Motors sind.

Bei $r = 1$ ist die Abhängigkeit streng funktionell, bei $r = 0{,}9 - 1$ besteht eine enge liniare Zuordnung; bei $r = 0{,}7 - 0{,}9$ eine gesteigerte Zuordnung, bei $r = 0{,}5 - 0{,}7$ eine beachtenswerte Zuordnung; bei $r = 0{,}3 - 0{,}5$ eine gemässigte Zuordnung, bei $r = 0 - 0{,}3$ eine sehr kleine Zuordnung; bei $r = 0$ keine Zuordnung (*6,8*).

Die Wahrscheinlichkeit, dass der berechnete Wert r einer wirklichen Lage entspricht (und nicht einem Zufall), ergibt sich aus:

$$P = 2\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}}\,\mathrm{d}_z \tag{37}$$

worin

$$z = \frac{(r)}{1 - r^2}\cdot\sqrt{n} \tag{38}$$

n = Gesamtanzahl der Paare Parameter — Kriterium, die untersucht werden.

Nach Berechung von z, kann die Wahrscheinlichkeit P aus der Wertetabelle der Laplace-Funktion abgelesen werden (11, *Beilage II*; 16, *Beilage VI*).

Nachdem die richtige Zuordnung zwischen Kriterium und Parameter überprüft worden ist, wird das Problem der Ermittlung der stochastischen Funktionen (*28—33*) in allgemeiner Form gemäss *(36)* gestellt, in der Weise, dass die Prüfungsgrenze des Kriteriums ermittelt werden soll, wenn der Grenzwert des Parameters bekannt ist. Da die Regression liniar ist, hat die stochastische Funktion das Aussehen wie in *Abb. 2.* Wenn der Grenzwert des Parameters gegeben ist, erhält man den Grenzwert des Kriteriums auf Grund der Vereinbarung bezüglich des Risikos des Lieferanten q_I und des Risikos des Kunden q_{II}.

Für die industrielle Praxis wird die Gleichheit des Risikos empfohlen: $q_I = q_{II}$ (*14*), die im vorliegenden Fall auch den Vorteil hat, dass die Schlussfolgerung für einen Motor die höchste Prüfungswahrscheinlichkeit besitzt. Wenn also die Grenze des Parameters L_p bekannt ist, ergibt sich die Prüfungsgrenze L_c aus:

$$\begin{cases} q_I = q_{II} \\ L_c = \bar{c} + \dfrac{\sigma_c}{r\sigma_p}\,(L_p - \bar{p}) \end{cases} \tag{39}$$

worin:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\bar{c} - c_i)^2}{n-1}} \tag{40}$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\bar{p} - p_i)^2}{n-1}} \tag{41}$$

Für andere Werte des Kriteriums ergeben sich die Risiken aus:

$$q_I = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\infty}^{z} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = F(z)\,;\; q_{II} = 1 - q_I \tag{42}$$

worin:

$$z = \frac{L - L_c}{\frac{\sqrt{1 - r^2}}{r}\,\sigma_c} \tag{43}$$

Die Funktion $F(z)$ der normalisierten Normalverteilung wird in den Tabellen angeführt (*11 S.808*).

Das Toleranzfeld um den berechneten Wert L_c ergibt sich aus dem wahrscheinlichen Fehler der durch die statistische Berechnung erhalten wird, die einer endlichen Zahl von n Typenprüfungen zu Grunde liegt.

Wenn man

$$\Delta_c = \pm \frac{\sigma_c}{\sqrt{n}} \tag{44}$$

als genügend für den vorliegenden Fall betrachtet, erhält man eine einseitige Wahrscheinlichkeit des Fehlers von $P = 0{,}85$.

Die auf Grund der Tatsache, dass die Kriterien die Prüfungsgrenze nicht beachten,

$$\begin{aligned} &c > L_c \text{ bei einem Kriterium mit oberer Grenze,} \\ &c < L_c \text{ bei einem Kriterium mit unterer Grenze,} \end{aligned} \tag{45}$$

abgewiesenen Motore werden wegen wirtschaftlicher Erwägungen folgendem Vorgang unterworfen:

— die Motore, die die Wahrscheinlichkeit aufweisen trotzdem zu entsprechen bzw. das Risiko I-sten Grades von:

$$\begin{cases} q_I = (0{,}3\text{—}0{,}5) \\ \text{bei } \theta, \eta, \cos\varphi \end{cases} \quad \text{und} \quad \begin{cases} q_I = (0{,}15\text{—}0{,}5) \\ \text{bei } k_{I_p},\; k_{M_p} \end{cases}$$

werden in Gruppen zugelassen oder abgewiesen (wenn sie gleiche Daten der Serienprüfung aufweisen) auf Grund von zusätzlichen direkten Typenprüfungen des Motors der im Rahmen der Gruppe die schwächsten Leistungsdaten besitzt. Die Grenzen gehen aus der wirtschaftlichen Bedingung hervor, dass die Kosten unnötiger Typenprüfungen von tatsächlich nichtentsprechenden Motoren kleiner sein müssen, als die Kosten der Verbesserungsarbeiten der tatsächlich entsprechenden Maschinen. Aus den gleichen Ueberlegungen geht hervor, dass die gebildeten Gruppen annähernd (*10—20*) Maschinen umfassen müssen damit die Methode wirtschaftlich ist.

— Die Motoren die nur die Wahrscheinlichkeit q_I zu klein ausweisen, um zu entsprechen

$$\begin{cases} q_I \leqslant 0{,}3 \\ bei\ \theta,\ \eta, \cos\varphi \end{cases} \quad \begin{cases} q_I \leqslant 0{,}15 \\ bei\ k_{I_p}, k_{M_p} \end{cases}$$

werden direkt zwecks Verbesserungsarbeiten zurückgewiesen.

Die der Methode entsprechenden Prüfungsgrenzen gehen aus dem untenstehenden Prüfungsschema hervor:

Prüfungsschema				
Kriterium für θ, η, $\cos\varphi$	Der zufassende Beschluss	Risiko	Prüfungszone	Kriterium für k_{I_p}, k_{M_p}
L_c	Direkt zugelassene Motore	$q_I = q_{II}$	I.	L_c
$L_c \pm \frac{\sigma c}{\sqrt{n}}$	Toleranzzone		II.	$L_c \pm \frac{e}{n}$
c	In Gruppen zugelassene oder abgewiesene Maschinen, mit einer identischen Angabe der Serienprüfung auf	$q_I = 0{,}3—0{,}5$	III.	c
	Grund der direkten zusätzlichen Prüfung mittels Typenprobe einer Maschine der Gruppe	$q_I = 0{,}15 — 0{,}5$		
$L_c \pm \frac{1}{2}X$				$L_c \pm X$
$X = \frac{\sqrt{1-r^2}}{r}\sigma_c$	Direckt abgewiesene Maschinen zwecks Verbesserungsarbeiten	$q_I = 0{,}15$	IV.	$X = \frac{\sqrt{1-r^2}}{r}\sigma_c$

Die Genauigkeit der Berechnung kann beurteilt werden, indem der Tatsache Rechnung getragen wird, dass in der Formel für die Ermittlung der Prüfungsgrenze L_c das numerische Gewicht dem Modul des Kriteriums zukommt. Mit einer einseitigen Bedeutung von 97,73% für den höchsten Fehler, ergibt sich folglich:

$$\varepsilon = \frac{2\,\sigma_c}{\sqrt{n \cdot \bar{c}}}. \tag{46}$$

Die wissenschaftliche Begründung der Ermittlung der Kriteriengrenzen auf rein experimentellem Weg, die Genauigkeitsberechnung der Schlussfolgerungen und die Klassifizierung der abgewiesenen Motore für direkte Messung der in Frage stehenden Parameter umschliesst in ihrer Gesamtheit eine genaue wissenschaftliche Prüfung mit hoher technisch-ökonomischer Wirtschaftlichkeit.

2.3.4. *Die Prüfungsmethodologie auf Grund der Kriteriengrenzen*

Im Falle der Kenntnis der Prüfungsgrenzen der Kriterien wird das Problem der Festlegung einer Untersuchungsmethodologie gestellt, wenn die sechs Grössen (U_0, I_0, P_0; U_{sc}, I_{sc}, P_{sc}) diese Grenzen einhalten:

$$c = f(U_0, I_0, P_0; U_{sc}, I_{sc}, P_{sc}) \gtrless L_c \tag{47}$$

Da die Grenze des Kriteriums und der Ausdruck des Kriteriums bekannt sind, können zwei Probleme gelöst werden:

— *die Auffindung von Einzelgrenzen für mit Bestimmtheit gute Maschinen und von Einzelgrenzen für mit Bestimmtheit nichtensprechende Maschinen;*

— *die Ermittlung von Prüfungsmethoden für Maschinen mit Daten die zwischen diesen Grenzen liegen.*

Die Ermittlung von Einzelgrenzwerten wird relativ einfach vorgenommen, indem angenommen wird $U_0 = U_{on}$; $U_{sc} = U_{scn}$. Wenn die Schwankungsgrenzen der Prüfungsdaten bekannt sind, ergeben sich aus dem Ausdruck der Kriterien die Wertepaare die die Ungleichung *(47)* befriedigen. Das Wertepaar wird so gewählt, dass es einen möglichst grossen Teil des geprüften Loses umfasst.

Werden die Ausdrücke der Kriterien analysiert *(Beziehungen 28—33)*, dann geht daraus hervor, dass ohne eine analytische Zwischenberechnung überprüft werden kann ob die sechs bei der Serienprüfungen gemessenen Grössen die Grenzen der Kriterien einhalten. In diesem Sinne genügt das Konstruieren von drei Prüfzonen für die Ungleichungen $C \lesseqgtr L_c$, während die Umrechnungen auf die Nennspannung und den Nennstrom mittels des Nomograms in N durchgeführt wird. So erhalten wir auf Grund der Ungleichungen der Kriterien:

$$C_\vartheta = P_0 \left(\frac{U_n}{U_0}\right)^2 + P_{sc} \left(\frac{I_n}{I_{sc}}\right)^2 \leqslant L_{C_\vartheta} \tag{48}$$

$$C_\eta = P_0 \left(\frac{U_n}{U_0}\right)^2 + P_{sc} \left(\frac{I_n}{I_{sc}}\right)^2 \leqslant L_{C_\eta} \tag{49}$$

$$C_{k_{I_p}} = I_{sc} \frac{U_n}{U_{sc}} \leqslant L_{C_{k_{I_p}}} \tag{50}$$

$$c_\varphi = \frac{I_{sc} \dfrac{U_n}{U_{sc}}}{I_0 \dfrac{U_n}{U_0}} \geqslant L_{C_\varphi} \tag{51}$$

$$c_\lambda = \frac{I_{sc} \dfrac{U_n}{U_{sc}}}{I_0 \dfrac{U_n}{U_0}} \geqslant L_{C_\lambda} \tag{52}$$

$$C_{k_{M_p}} = P_{sc} \left(\frac{U_n}{U_{sc}}\right)^2 - r_c \cdot \left(I_{sc} \frac{U_n}{U_{sc}}\right)^2 \geqslant L_{C_{k_{M_p}}} \tag{53}$$

in denen die Prüfungsgrenzen aus dem Prüfungsschema hervorgehen und die drei Prüfungsbereiche erhalten werden (*Abb. 8, 9 und 10*).

Die Prüfzonen I—IV haben die dem Prüfungsschema entsprechende Bedeutung.

Falls bei der Serienprüfung eines Motors die ihm eigenen Werte U_{01}, I_{01}, P_{01}; U_{sc1}, I_{sc1}, P_{sc1} gemessen werden, wird auf Grund der Einzelgrenzwerte sofort bemerkt ob der Motor gut oder bestimmt nichtentsprechend ist. Sind die Daten zwischen diesen Grenzwerten enthalten, dann kann durch die diesen Daten entsprechende Einzeichnung des Punktes P in die drei Prüfzonen (*Abb. 8—10*) sofort und einfach bestimmt werden, ob der Motor entspricht oder nicht, welches der nichtüberprüfte Parameter ist und welches die Möglichkeit seiner Verwertung ist (Typenprobe oder Verbesserungs-

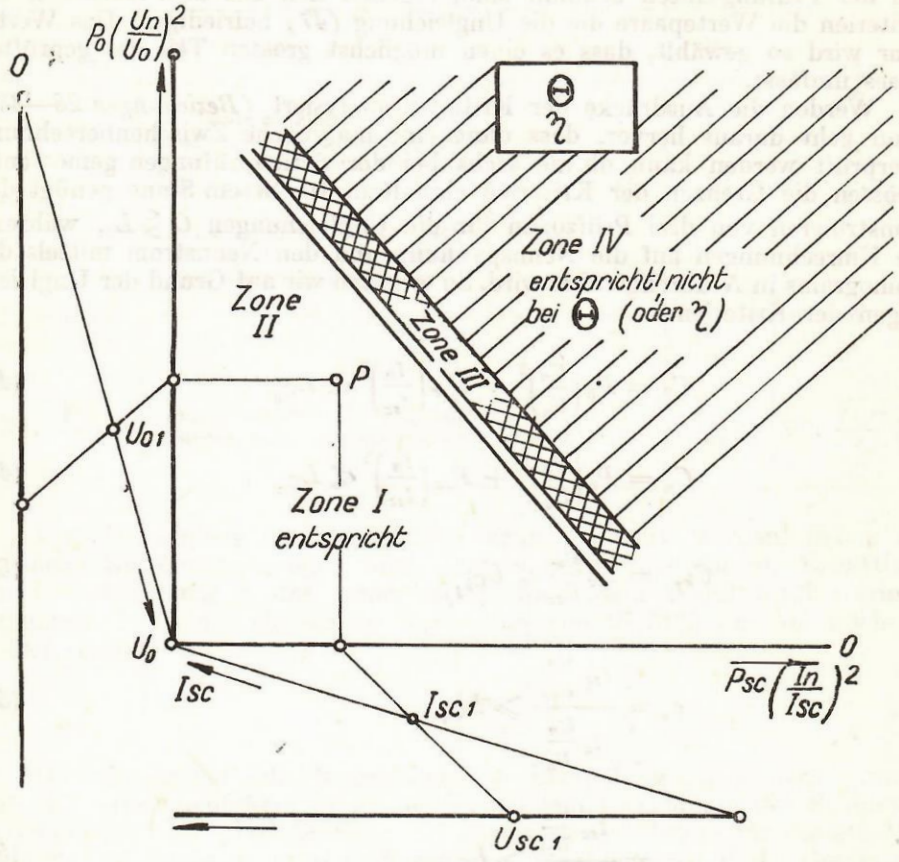

Abb. 8: Prüfzone für θ und η

arbeiten). Die Auslegung ist also einfach, leicht und anschaulich, und verlangt keine besonderen Bedingungen bezüglich der Befähigung und der Arbeitsleistung. Der Arbeitsumfang des Gütekontrolleurs am Serienprüfstand ist gering, unter dem Bedarf jedweder anderen rationnelen Methode.

Die durchgeführten Typenprüfungen haben die Sicherheit der dem Motor auf Grund der Methode zugestandenen Beurteilung bewiesen; die Ergebnisse sind in (*18, 19*) analysiert. Die überzeugendste Ueberprüfung begründet sich auf die Gegenüberstellung der Schlussfolgerungen der an 150

Maschinen durchgeführten direkten Typenprüfungen mit der mittels der Methode der komplexen Kriterien zugestandenen Beurteilung. Die Fehler (falsche Behauptungen) waren von $\varepsilon_\theta = 3\%$ bei der Erwärmung, $\varepsilon_\eta = 0\%$ beim Wirkungsgrad, $\varepsilon_{I_p} = 0\%$ beim Anlaufstrom, $\varepsilon_\varphi = 10\%$ beim Leistungs-

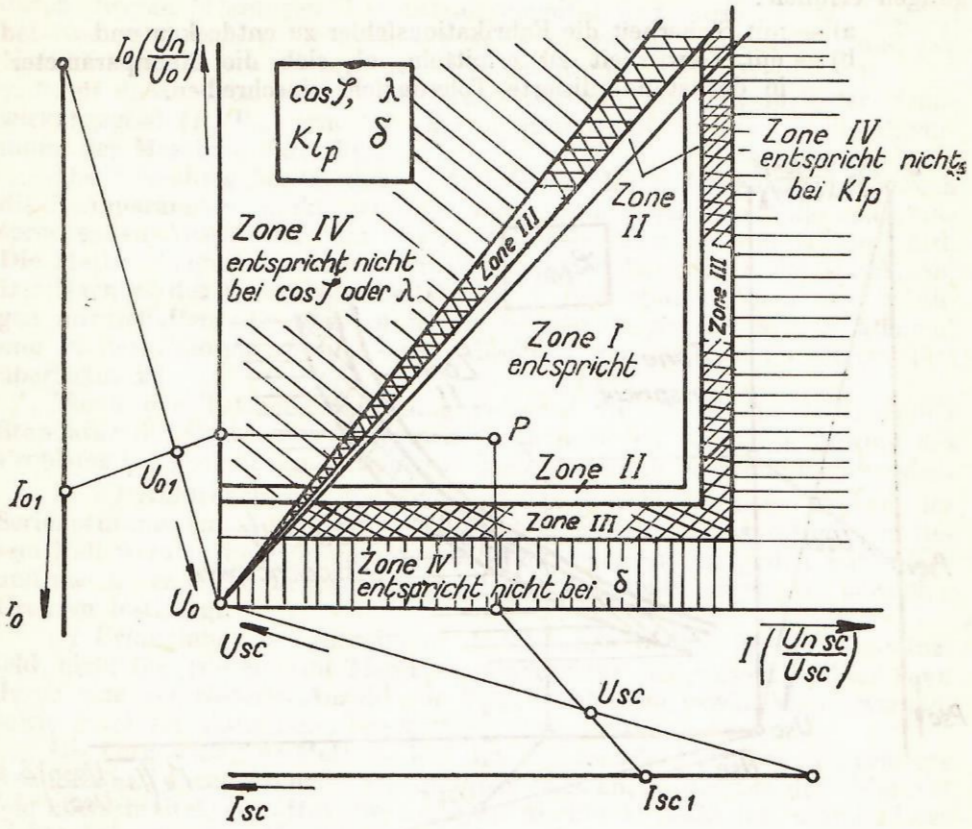

Abb. 9: Prüfzone für cos φ, λ, K_{I_p} und δ

faktor (da der Motor Doppelkäfig besitzt) und von $\varepsilon_{M_p} = 1\%$ beim Anlaufdrehmoment. Die Fehler ergeben sich also im Einklang mit der normalen Lage bei den Serienprüfungen.

Die „Electromotor" — Werke, Timişoara haben die Vorteile dieser Methode erfasst und nach dem Erproben der Methode im Laufe eines Jahres an einer in Grosserienfertigung hergestellten Motortype, sind sie zur allgemeinen Anwendung bei allen in genügend grosser Serienfertigung hergestellter Motorentypen übergegangen. Die erzielten Ergebnisse haben den geringen Bedarf an Arbeitsleistung und die technisch-ökonomische Wirtschaftlichkeit der Methode unterstrichen.

Bei der Lösung des gestellten Problems kann vom Problem des eigentlichen Zwecks der Endserienprüfung von Induktionsmaschinen ausgegangen werden. Im Wesentlichen müssen die Serienprüfungen folgende zwei Bedingungen erfüllen:

a) — mit Sicherheit die Fabrikationsfehler zu entdecken und
b) — mit Gewissheit zu ermitteln, ob sich die Nennparameter in das standardisierte Toleranzfeld einschreiben.

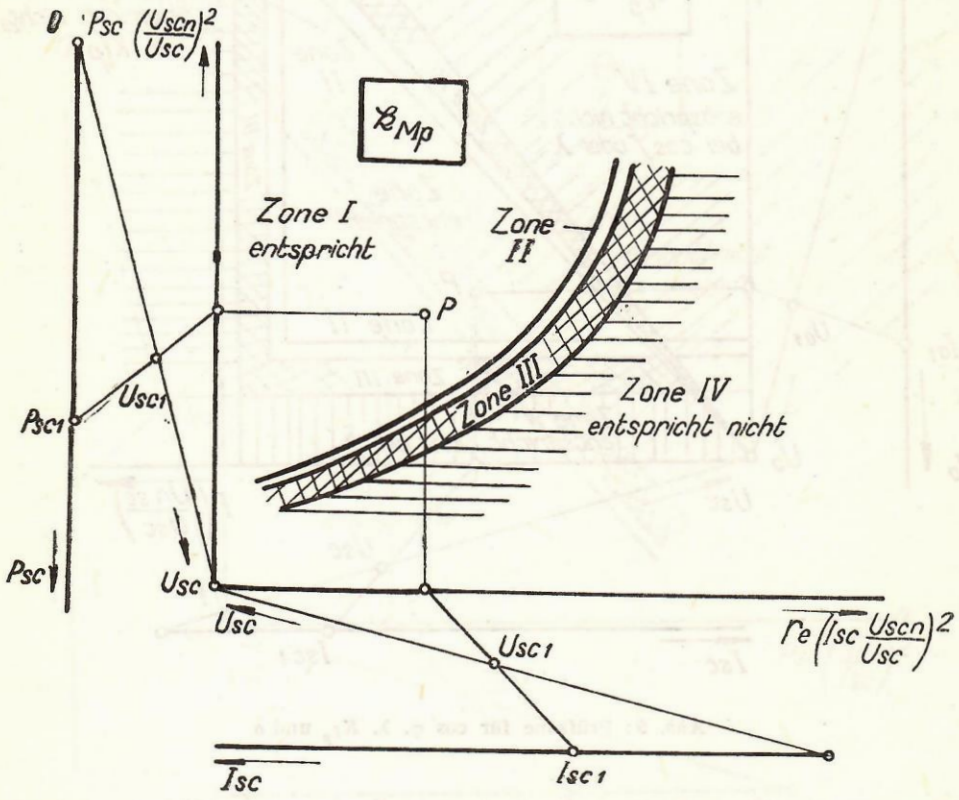

Abb. 10: Prüfzone für K_{M_p}

Wenn man die Lage durch das Blickfeld dieser zwei Bedingungen betrachtet, kann die Lösung sowohl in der Aenderung des Programminhaltes der Serienprüfungen als auch in der Aufrechterhaltung der vorhanden Prüfungen und in der Anpassung einer objektiven Auslegungsmethode gefunden werden.

Falls die Aenderung der bei der Serienprüfung vorgesehenen Proben angenommen wird, begründet sich der Vorschlag auf die Tatsache, dass moderne Lösungen für schnelle und sehr genaue Messungen vorhanden sind (auch unter 0,1%), mit billigen Apparaten und mit direkter Lesung der

mechanischen Leistung an der Welle (Pendeldynamometer). In dieser Richtung wird folgende Lösung vorgeschlagen:

A. *a)* Aufdecken der Fabrikationsfehler durch die Proben der Serienprüfung ohne der Leerlauf- und Kurzschlussprüfung.

b) Ermittlung der Einreihung der Nennparameter in das Toleranzfeld durch direkte Messungen des Anlaufmomentes und -stromes (M_p *und* I_p) bei Nennspannung, sowie auch der aufgenommenen Leistung P_{1n} und des Nennleistungsfaktors $\cos \varphi_{1n}$, bei Nennbelastung an der Welle (P_n).

Auf diese Weise wird durch direkte Messung von P_{1n} auch der Nennwirkungsgrad (P_n/P_{1n}) ermittelt, der ein direktes Kriterium für die Erwärmung der Maschine darstellt.

Der Vorschlag besitzt den Vorteil der höchsten Genauigkeit, da auch die Nennparameter direkt gemessen werden, ohne dass, im Falle einer entsprechenden Ausrüstung, die nötige Arbeitsleistung zu viel erhöht wird. Die Methode eignet sich besonders bei geringen Leistungen der Maschinen. Der Nachteil des Vorschlages besteht in der Notwendigkeit neue Ausrüstungen anzuschaffen (die aber in jedem Betrieb hergestellt werden können) und in der Umorganisierung einer Abteilung, die auch so im allgemeinen überlastet ist.

Wenn der Tatsache Rechnung getragen wird, dass die bestehenden Standards die Proben der Serienprüfungen festlegen, kann die Lösung des Problems bei Einhaltung derselben in zwei Varianten vorgenommen werden.

B. *a)* Aufdecken der Fabrikationsfehler durch sämtliche Proben der Serienprüfung, einschliesslich der Leerlauf- und Kurzschlussprüfung. In diesem Fall werden die Prüfungsgrenzen leicht, getrennt für jeden Parameter und gleich der durch die Streuung des Fabrikationsloses gegebenen normalen Grenzen festgelegt.

b) Ermittlung der Einreihung der Nennparameter in das Toleranzfeld, nicht für jede einzelne Maschine, sondern für das ganze Los. Dies kann durch eine vergrösserte Anzahl von Typenprüfungen gewährleistet werden, sowie durch die statistische Bearbeitung der erzielten Daten.

Die vorgeschlagene Methode löst das Problem, fordert aber eine grössere Anzahl von Typenprüfungen. Die Methode zeigt an, ob das Los das Toleranzfeld überschreitet, gestattet aber nicht die direkte Auswahl der guten und der nichtentsprechenden Maschinen.

Die Beibehaltung der Leerlauf- und Kurzschlussprüfungen zur Untersuchung der Nennmerkmale ist die Grundlage der zweiten Lösungsvariante.

C. *a)* Aufdecken der Fabrikationsfehler mittels der normalisierten und laufend gebrauchten Kontrollprüfungen.

b) Ermittlung der Einreihung der Nennparameter in das Toleranzfeld durch die objektive Auslegung der bei der Leerlauf- und Kurzschlussprüfung erzielten Daten.

Der Vorteil des letzten Vorschlages besteht nicht nur in der Tatsache, dass er formell die Bedingungen der Standards von internationalem Gebrauch beachtet, jede hergestellte Maschine der Serienprüfung zu unterwerfen, sondern auch, im Grunde genommen, im Sinne des Zweckes dieser Prüfungen, eingehend die Gesamtheit der Nennparameter, beziehungsweise die Qualität jeder einzelnen hergestellten Maschine zu überprüfen.

Hauptsächlich die Einhaltung der Standards, der bestehenden Praxis der Ausrüstung und der vorhandenen Möglichkeiten hat dazu beigetragen,

dass der letzte Vorschlag im Rahmen einer Vereinbarung über die Zusammenarbeit zwischen den „Electromotor" — Werken, Timişoara und dem Katheder für elektrische Maschinen der Technischen Hochschule in Timişoara in nähere Erwägung gezogen wurde. In dieser Weise ist die Methode der komplexen Kriterien ausgearbeitet worden (*17*, *19*), als eine objektive Methode bei der die Grenzen der Kriterien auf Grund genauer, rein experimenteller Daten festgelegt werden und die Arbeitsmethodik den technisch-ökonomischen Bedingungen eines industriellen Prüfstandes entspricht.

Die in der industriellen Praxis vorgenommene Prüfung im Rahmen der „Electromotor" — Werke, Timişoara und die erhaltenen Ergebnisse empfehlen die Verallgemeinerung dieser Methode.

Da der Standard *STAS 1893-50*, der auch die Serienprüfung als Form und Grundlage festlegt, überprüft wird, ist die Analyse oder die eventuelle Inhaltsänderung der Serienprüfung wünschenswert oder müsste die Auslegungsmethode der Ergebnisse genau umrissen werden.

Auf diese Weise wird nicht nur die technisch-ökonomische Wirtschaftlichkeit der vorgesehenen Prüfungen erhöht, sondern es wird auch die Gewissheit der Qualität der Maschinen gewährleistet — ein Schlüsselproblem und eine Grundaufgabe in der jetzigen Entwicklungsetappe unserer Industrie.

LITERATURVERZEICHNIS

1. GRAF U., *Statistische Methoden in der Elektroindustrie*, in: E.T.Z.—72 No. 1, 1951
2. ARISTOV I. A., KOLDERŢEV N. S., *Folosirea controlului statistic în uzina de construcţii de maşini* (Uebersetzung aus dem Russischen) I.D.T., Bucureşti 1952
3. ГОЛДЕРГ О. Д. Контроль и анализ количества трехфазных асинхронных электродвигателей в серийном производстве по результатам контрольных испытаний. Диссертация, 1954 — Н.И.И. — М.Э.П. — СССР.
4. ГОЛДБЕРГ О.Д. Анализ материалов контроля асинхронных злектродвигателей при контрольных испытаниях. Вестник злектропромышленности 27, № 12, 1956.
5. ГОЛДБЕРГ О.Д. Методика расчета технических норм на допустимые значения параметров контрольных испытаний трехфазных асинхронных злектродвигателей. Информацнонный сборник ТБТИ — М.З.П. № 19, 1956.
6. KLEGA V., *Metode de interpretare a datelor obţinute experimental* (Uebersetzung aus dem Tschechischen) I.D.T., Bucureşti, 1958
7. IORGA M., MARINESCU A., und ADRIAN A., *Diagrame, abace, nomograme.* Editura Tehnică, Bucureşti, 1959.
8. WORTHING H. und GEFFNER I., *Prelucrarea datelor experimentale* (Uebersetzung aus dem Englischen) Editura Tehnică, Bucureşti, 1959.
9. OPRENDECK A. und OPRENDECK B., *Unele probleme cu privire la aplicarea calculului probabilităţilor în control tehnic*". Metalurgia şi construcţia de maşini", No. 8, 1960
10. JERVE G. K., *Încercările industriale ale maşinilor electrice* (Uebersetzung aus dem Rusischen) Editura Tehnică, Bucureşti, 1961.
11. RANCU N. und TÖVISSI I., *Statistica matematică cu aplicaţii în producţie.* Editura Academiei, Bucureşti, 1963.
12. FABIAN T., *Metode ale statisticii matematice cu aplicaţii la controlul calităţii motoarelor electrice de putere mică produse în serii mari.* În: „Electrotehnica", No. 10, 1963
13. OPRENDECK B. und BABUŢIA I., *Asupra eficienţei controlului tehnic de serie al maşinilor de inducţie.* In: „Electrotehnica", No. 11—12, 1963

14. RANCU N. und TÖVISSI I., *Analiza statistico-matematică a calităţii producţiei industriale.* Editura Ştiinţifică, Bucureşti 1964.
15. OPRENDECK B. und FARCAŞ D., *Principii de programare a calculatoarelor electronice numerice în vederea stabilirii indicilor de control la încercările de serie ale maşinilor de inducţie.* In: Buletinul Institutului Politehnic Timişoara, 1964, Fasc. 2.
16. OPRENDECK B. und BABUTIA I., *Metodă statistică pentru interpretarea măsurătorilor controlului de serie al maşinilor electrice.* Im Band: „Calculul Economic". Editura Academiei, Bucureşti, 1964.
17. OPRENDECK B., *Metodă pentru interpretarea datelor controlului de serie la maşini sincrone.* In: „Electrotehnica", 1966.
18. BABUŢIA I. und OPRENDECK B., *Verificarea în practica industrială a metodei criteriilor complexe la controlul de serie al maşinilor asincrone.* In: „Electrotehnica", 1966
19. OPRENDECK B., *Contribuţii la controlul industrial al caracteristicii mecanice şi al parametrilor nominali ai maşinilor de inducţie.* Dissertationsarbeit. Institutul Politehnic Timişoara, 1966.

STATISTICAL AND MATHEMATICAL ASPECTS OF SERIAL CONTROL CONCERNING NON-SYNCHRONOUS MACHINES

The tasks of serial control in the making of non-synchronous machines are pointed out in this paper. Indirect control is then studied, from the standpoint of probabilism and statistics. Known methods of interpretation, now in use, are presented further on, together with an analysis of their statistical and mathematical essential elements.

Conclusions are supported by a rich experimental material, while the economic aspect of the problem is particularly stressed. Finally, the authors demonstrate the discrepancy between the method of individual limits and that of limits for odd values, with the required technical and economic tasks. They conclude by proposing the method of complex criteria on the ground of the results obtained by its industrial application at "Electromotor" works in Timişoara, with a view to extend it to all non-synchronous machine-building factories.

ASPECTS STATISTIQUES-MATHÉMATIQUES DU CONTRÔLE DE SÉRIE DES MACHINES ASYNCHRONES

On présente dans cette étude les tâches du contrôle de série dans la fabrication des machines asynchrones. On y analyse, sous l'aspect du probabilisme et de la statistique, la méthode du contrôle indirect. On y décrit les méthodes d'interprétation actuellement en usage et on analyse le fond statistique-mathématique.

Les conclusions s'appuyent sur un riche matériel expérimental, tout en soulignat l'aspect économique du problème. Enfin, on démontre l'incompatibilité de la méthode des limites individuelles et de celle à limites pour valeurs impaires avec les tâches techniques-économiques imposées. On propose, en conclusion, la méthode des critériums complexes, recomandée à la suite des résultats obtenus par son application industrielle à l'entreprise „Electromotor" de Timişoara en vue de sa généralisation dans toutes les fabriques constructrices de machines asynchrones.

СТАТИСТИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СЕРИЙНОГО КОНТРОЛЯ АСИНХРОННЫХ МАШИН

В работе речь идет о задачах серийного контроля производства асинхронных машин. Анализируется вероятностный и статистический аспект контроля, осуществленного косвенным путем. Показаны известные методы толкования и анализируется их статистико-математическая сущность.

Выводы подтверждаются обширным опытным материалом, с учетом экономического аспекта. В конце показывается несоответствие поставленным технико-экономическим задачам метода индивидуальных лимитов и метода с лимитом стоимостей-пар. В заключение предлагается метод сложных критериев, рекомендуемый на основе полученных результатов при их промышленном применении на предприятии «Электромотор» из Тимишоры для обобщения на всех фабриках, производящих асинхронные машины.