

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 62 (1971)  
**Heft:** 4

**Artikel:** Nouvelle méthode pour la linéarisation de l'échelle des voltmètres électrostatiques à aiguille  
**Autor:** Antoniu, M.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915804>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.01.2026

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

# Nouvelle méthode pour la linéarisation de l'échelle des voltmètres électrostatiques à aiguille

Par M. Antoniu, Jassy

621.317.725: 53.082.72

On examine d'abord l'influence de la linéarisation de l'échelle du voltmètre électrostatique par la méthode classique, sur les paramètres de qualité de ce voltmètre. On présente ensuite une nouvelle méthode pour modifier l'équation de fonctionnement du voltmètre électrostatique, fondée sur la variation de la tension d'entrée aux électrodes actives, à l'aide d'un diviseur de tension capacitif, constitué et commandé par le mécanisme voltmétrique même. On décrit deux variantes du voltmètre à variation de tension à un seul et à deux couples électriques.

Par rapport au voltmètre classique, le nouveau type de voltmètre assure un facteur de qualité de *Keinath* en quelque sorte meilleur, une limite supérieure du domaine de fréquence plus élevés et une géométrie des électrodes actives plus simple, mais exige en échange une isolation électrique de meilleure qualité.

## 1. Introduction

Le voltmètre électrostatique à aiguille [1, 2]<sup>1)</sup> présente de nouveau de l'importance en vertu de son utilisation en tant qu'appareil de tableau pour des tensions et des fréquences élevées [3, 4] et, surtout, à cause de son inclusion en divers appareils électroniques de mesure [5; 6].

Lorsqu'on construit un pareil voltmètre il existe la nécessité de la linéarisation (uniformisation) de l'échelle graduée qui est, normalement, quadratique. Cette linéarisation est obtenue, d'une manière classique, par la modification adéquate du terme  $dC/d\alpha$  de l'expression du couple actif, c'est-à-dire en modifiant la géométrie des électrodes actives. Cette méthode présente le désavantage de provoquer une certaine complication de la géométrie des électrodes actives et une réduction importante du facteur de qualité de *Keinath*. Un autre désavantage du voltmètre électrostatique classique est constitué par la présence du ressort antagoniste dans le circuit électrique propre, présence qui devient gênante lorsqu'on doit effectuer des mesures en hautes fréquences.

Dans ce travail-ci on présente une nouvelle méthode de linéarisation de l'échelle du voltmètre électrostatique en gardant  $dC/d\alpha = \text{constant}$  (donc la géométrie la plus simple), on varie la tension d'entrée aux électrodes actives à l'aide d'un diviseur de tension capacitif, variable, constitué et commandé par le mécanisme même du voltmètre. Cette méthode s'appellera méthode de la variation de la tension et le voltmètre dont la construction repose sur cette méthode voltmètre à variation de la tension. Par rapport à la méthode classique on a les avantages suivants: on garde le caractère simple de la géométrie des électrodes du voltmètre quadratique, on améliore en quelque sorte le facteur de qualité de *Keinath* et on aboutit à une augmentation considérable du domaine de fréquences.

Nous décrivons, en tant que l'application de la nouvelle méthode, deux voltmètres à variation de tension qui, pour

Der Einfluss der Linearisierung der Skala des elektrostatischen Voltmeters nach der klassischen Methode wird im Hinblick auf die Qualitätsparameter des Voltmeters untersucht. In der Folge wird eine neue Methode für die Modifikation der Funktionsgleichung des elektrostatischen Voltmeters gezeigt, welche auf der Variation der Eingangsspannung der aktiven Elektroden beruht. Das wird mit Hilfe eines kapazitiven Spannungsteilers, der aus dem Voltmetermechanismus selbst besteht und durch diesen gesteuert wird, erreicht. Zwei Varianten des Voltmeters mit Spannungsvariation werden beschrieben, mit einem oder zwei elektrischen Drehmomenten.

Im Vergleich mit dem klassischen Voltmeter bietet der neue Typ einen verbesserten Qualitätsfaktor nach *Keinath*, eine höhere obere Frequenzgrenze und eine einfachere Geometrie der aktiven Elektroden, aber verlangt dafür eine bessere Qualität der elektrischen Isolation.

simplifier, seront notés par  $V_1$  et, respectivement,  $V_2$ ; le voltmètre électrostatique linéaire (échelle uniforme) classique et celui quadratique seront notés par  $V_k$ , respectivement,  $V_q$ .

L'idée de la modification de la caractéristique de l'échelle aux appareils de mesure par d'autres voies que la modification de la géométrie du mécanisme de l'appareil respectif est connue et a été déjà appliquée aux appareils magnétoélectriques [7], mais on n'a pas essayé, à ce que nous connaissons, de le faire aux voltmètres électrostatiques.

## 2. Critique de la méthode classique de linéarisation

### 2.1 Points de départ

Dans ce travail-ci la notion de linéarisation se rapporte à la modification de l'équation de fonctionnement du voltmètre électrostatique à aiguille de manière que la succession des divisions sur l'échelle suive une loi aussi rapprochée que possible de la loi linéaire.

On rencontre une multitude de variantes constructives de  $V_q$  et  $V_k$ , mais nous n'en prendrons en considération que les types monocellulaires à électrodes planes parallèles (fig. 1 et 2), qui sont plus souvent utilisés aux tensions de 1...3 kV.

Puisque dans le cas des voltmètres électrostatiques à aiguille la classe de précision est décidée principalement par l'erreur due au frottement des pivots, on prend comme base des discussions le facteur de qualité de *Keinath* [8]. Vu que celui-ci a la plus grande valeur dans le cas de  $V_q$  et qu'il est d'autant meilleur que la dimension radiale ( $R$ ) de l'électrode mobile est plus petite [9], la comparaison des voltmètres se fera au même  $R$  en prenant comme terme de comparaison le facteur de qualité de *Keinath* du voltmètre  $V_q$ .

### 2.2 Le voltmètre quadratique ( $V_q$ ) (Fig. 1)

Pour  $V_q$  le facteur de qualité de *Keinath* est

$$\Gamma_q = \frac{10 \alpha_n W_q}{G_q^{1,5}} \quad (1)$$

<sup>1)</sup> Voir bibliographie à la fin de l'article.



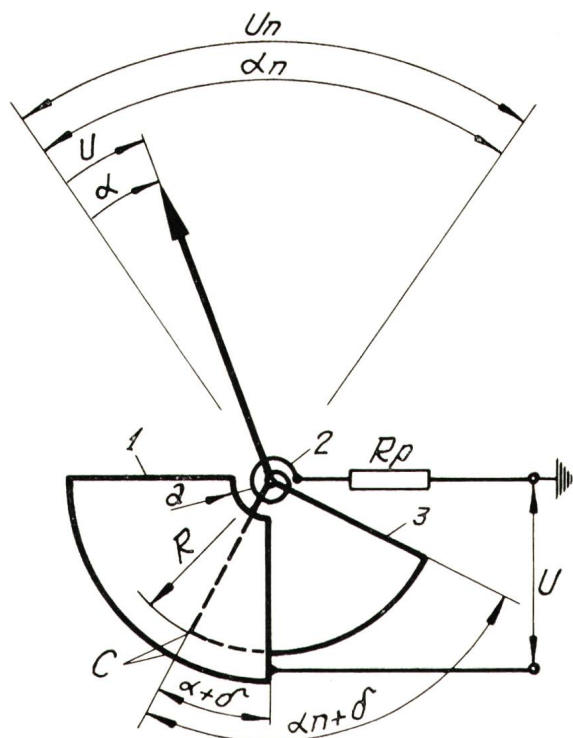


Fig. 1  
Voltmètre quadratique ( $V_q$ )

1 l'électrode fixe; 2 ressort antagoniste; 3 électrode mobile; C capacité entre les électrodes actives;  $\alpha_n$  angle total d'échelle;  $\delta$  angle d'avance de l'électrode 3 entre les parois de l'électrode 1 lorsque  $\alpha = 0$ ;  $U_n$  tension nominale du voltmètre; R dimension radiale;  $R_p$  résistance de protection nécessaire pour limiter le courant dans le ressort antagoniste s'il y a court-circuit entre les électrodes actives

où  $G_q$  est le poids de l'organe mobile et

$$W_q = \frac{\varepsilon E_L U_n R^2}{2 \alpha_n} \quad (a^2 \ll R^2) \quad (2)$$

est le couple stabilisant spécifique minimum (égal, numériquement, à la constante du ressort antagoniste 2) et où  $\varepsilon$  représente la permittivité du diélectrique (air) entre les électrodes actives et

$$E_L = \frac{U_n}{e} \quad (3)$$

l'intensité admissible du champ électrique de travail, où  $e$  est la distance entre les électrodes actives.

### 2.3 Le voltmètre linéaire classique ( $V_K$ )

On le représente dans la fig. 2, où  $r$  est le rayon variable définissant le contour de l'électrode mobile 3, tandis que les autres notations ont la même signification que dans la fig. 1.

Pour obtenir l'échelle linéaire (uniforme) il faut que C satisfasse la condition:

$$\frac{dC}{d\alpha} = \frac{\text{const.}}{\eta_0 + \eta} \quad (4)$$

ce qui conduit à la relation

$$\left(\frac{r}{R}\right)^2 \approx \frac{\eta_0}{\eta_0 + \eta} \quad (5)$$

où  $\eta_0$  est un paramètre ( $0 < \eta_0 < 1$ ), et

$$\eta = \frac{\alpha}{\alpha_n} \quad (6)$$

la déviation rapportée.

L'influence du paramètre  $\eta_0$  sur la distribution des divisions sur l'échelle graduée est indiquée dans la fig. 3; on observe que l'échelle n'est pas parfaitement linéaire et que sa linéarité s'améliore lorsque  $\eta_0$  baisse.

L'éloignement d'une échelle de la linéarité parfaite est évaluée par le coefficient de non-linéarité:

$$\nu = \frac{D_M}{D_m} \quad (7)$$

où  $D_M$  et  $D_m$  (fig. 3) représentent la division maxima et respectivement minima sur l'échelle (ou portion d'échelle) considérée. L'échelle est considérée pratiquement linéaire si  $\nu \leq 1,3$ . C'est dans ce sens que les échelles représentées dans la fig. 3 sont linéaires sur 85...95 % de leur longueur.

Enfin, si l'on note par  $W_K$  et  $\Gamma_K$  le couple stabilisant spécifique minimum et respectivement le facteur de qualité de Keimath, on a les relations:

$$W_K = \frac{\varepsilon E_L U_n R^2}{2 \alpha_n \left(1 + \frac{1}{\eta_0}\right)} \quad (8)$$

$$\Gamma_K = \frac{10 \alpha_n W_K}{G_K^{1,5}} \quad (9)$$

On observe qu'à l'abaissement de  $\eta_0$  — c'est-à-dire à l'amélioration de la linéarité de l'échelle —  $\Gamma_K$  baisse.

Dans la relation (9)  $G_K$  représente le poids de l'organe mobile constitué, de même que  $G_q$ , par l'addition des poids des pièces composantes: l'axe à pivots, l'aiguille, les contrepoids, la palette de l'amortisseur à air, l'électrode mobile; ces pièces sont identiques dans les deux cas, sauf les électrodes mobiles.

Comme pour équilibrer l'organe mobile de  $V_K$  on a besoin d'un contrepoids supplémentaire approximativement égal au poids de la portion découpée (hachurée sur la fig. 2) de e.m., il résulte que  $G_q \approx G_K$ . Dans cette hypothèse, en divisant (9) par (1) on obtient l'expression

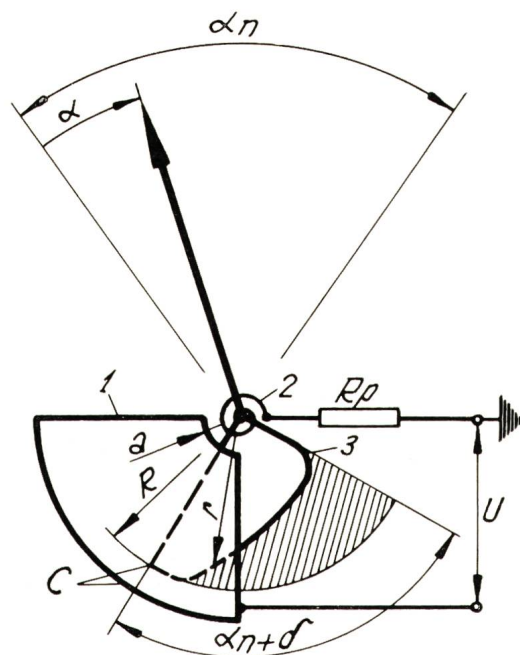


Fig. 2  
Voltmètre à échelle linéaire selon la méthode classique ( $V_K$ )  
Désignations voir fig. 1

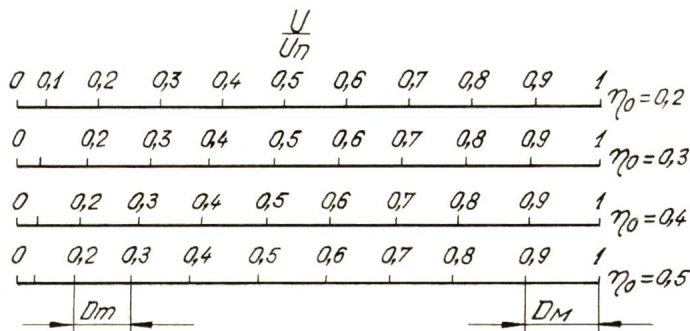


Fig. 3

La forme de l'échelle du voltmètre  $V_K$

$U$  tension à mesurer;  $U_n$  tension nominale du voltmètre;  $\eta_0$  paramètre géométrique du voltmètre

$$\frac{\Gamma_K}{\Gamma_q} \approx \frac{1}{1 + \frac{1}{\eta_0}} \quad (10)$$

qui est représentée graphiquement dans la fig. 4.

On a représenté sur la même figure la courbe  $\nu(\eta_0)$  déduite graphiquement de la fig. 3. On observe qu'aux mêmes dimensions radiales de l'électrode mobile et dans les limites  $\nu \leq 1,3$ ,  $V_K$  assure un facteur de qualité de *Keinath* d'un tiers, tout au plus, de la valeur de celui obtenu à  $V_q$ .

#### 2.4 Influence du ressort spiral antagoniste

L'erreur supplémentaire introduite par le ressort antagoniste à des fréquences élevées présente deux composantes:  $\gamma_L$  — déterminée par l'inductivité propre et

$$\gamma_R \approx -2\pi^2 f^2 C_1^2 R_p^2 \quad (11)$$

déterminée par la chute de tension sur la résistance de protection  $R_p$  où  $f$  est la fréquence de la tension à mesurer et  $C_1$  la capacité d'entrée du voltmètre. Vu que pour des constructions normales et  $f < 1\text{MHz}$ ,  $\gamma_L \ll \gamma_R$ , il résulte que la limite supérieure du domaine des fréquences est décidée par  $R_p$ .

Quant à la grandeur de  $R_p$ , la littérature indique comme valeurs minima (en fonction de la section du ressort antagoniste) 15...25 kΩ pour chaque kilovolt de la tension nominale du voltmètre.

### 3. Voltmètre électrostatique à variation de tension et un seul couple électrique

On le représente dans la fig. 5 où  $C_1$  est la capacité active et  $C_2$  la capacité constante servant à varier la tension ( $U_1$ ) d'entrée à  $C_1$  et, en même temps, au couplage capacitif entre une borne fixe extérieure et l'électrode mobile 3, en éliminant le ressort antagoniste du circuit électrique du voltmètre. L'électrode 3 est isolée électriquement par rapport à l'axe 4 à l'aide d'un manchon électroisolant de bonne qualité 5. Les autres notations ont les mêmes significations que ci-dessus.

#### 3.1 Equation de fonctionnement

Conformément à la fig. 5 on écrit les relations

$$C_1 = C_{10} + K\alpha \quad (12)$$

$$U_1 = U \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{U}{\psi} \quad (13)$$

$$U_2 = U \left(1 - \frac{1}{\psi}\right) \quad (14)$$

$$\psi = 1 + b[1 - \beta(1 - \eta)]$$

$$K = \frac{C_{1n} - C_{10}}{\alpha_n} = \varepsilon R^2, \quad (a^2 \ll R^2) \quad (15)$$

$$\beta = \frac{C_{1n} - C_{10}}{C_{1n}} = \frac{\alpha_n}{\alpha_n + \delta} \quad (16)$$

$$b = \frac{C_{1n}}{C_2} = \frac{\alpha_n + \delta}{\Theta_2} \quad (17)$$

$C_{10}$  et  $C_{1n}$  représentant les valeurs de  $C_1$  pour  $\alpha = 0$  et respectivement  $\alpha = \alpha_n$ ,  $\Theta_2$  — l'angle au centre de l'électrode fixe 2, tandis que  $\delta$  a la même signification que dans la fig. 1.

Sur l'organe mobile du voltmètre agit le couple direct

$$M_1 = \frac{1}{2} U_1^2 \frac{dC_1}{d\alpha} = \frac{K U^2}{2 \psi^2}$$

et respectivement opposant:

$$M_2 = W_1 \alpha$$

d'où, en écrivant la condition d'équilibre ( $M_1 + M_2 = 0$ ), on obtient l'équation de fonctionnement recherchée:

$$\eta[1 - m(1 - \eta)]^2 = \mu^2 \quad (18)$$

de même que la constante du ressort antagoniste:

$$W_1 = \frac{\varepsilon U_n^2 R^2}{2 e \alpha_n (1 + b)^2} \quad (19)$$

qui représente aussi le couple stabilisant spécifique minimum, puisque  $M_1$  baisse lorsque  $\alpha$  croît. On a utilisé dans ces relations les substitutions:

$$\mu = \frac{U}{U_n} \quad (20)$$

$$m = \frac{\beta b}{1 + b} = \frac{\alpha_n}{\Theta_2' + \alpha_n + \delta} \quad (21)$$

et  $e$  représente la distance entre les électrodes, laquelle, calculée conformément aux relations (13), est

$$b \leq 1 \rightarrow e = \frac{U_n}{(1 + b) E_L} \quad (22)$$

$$b \geq 1 \rightarrow e = \frac{b U_n}{(1 + b) E_L}$$

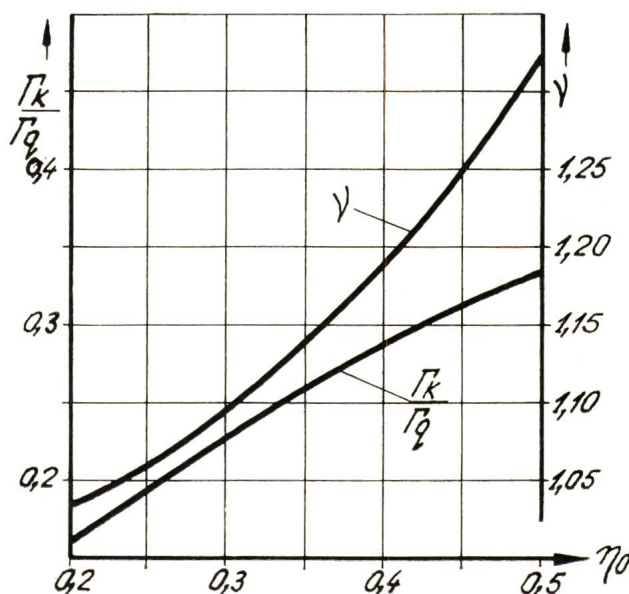


Fig. 4

Corrélations entre les paramètres du voltmètre  $V_K$

$\Gamma_K$  facteur de qualité de *Keinath* du  $V_K$ ;  $\Gamma_q$  facteur de qualité de *Keinath* du  $V_q$ ;  $\eta_0$  paramètre géométrique du voltmètre;  $\nu$  coefficient de non-linéarité de l'échelle



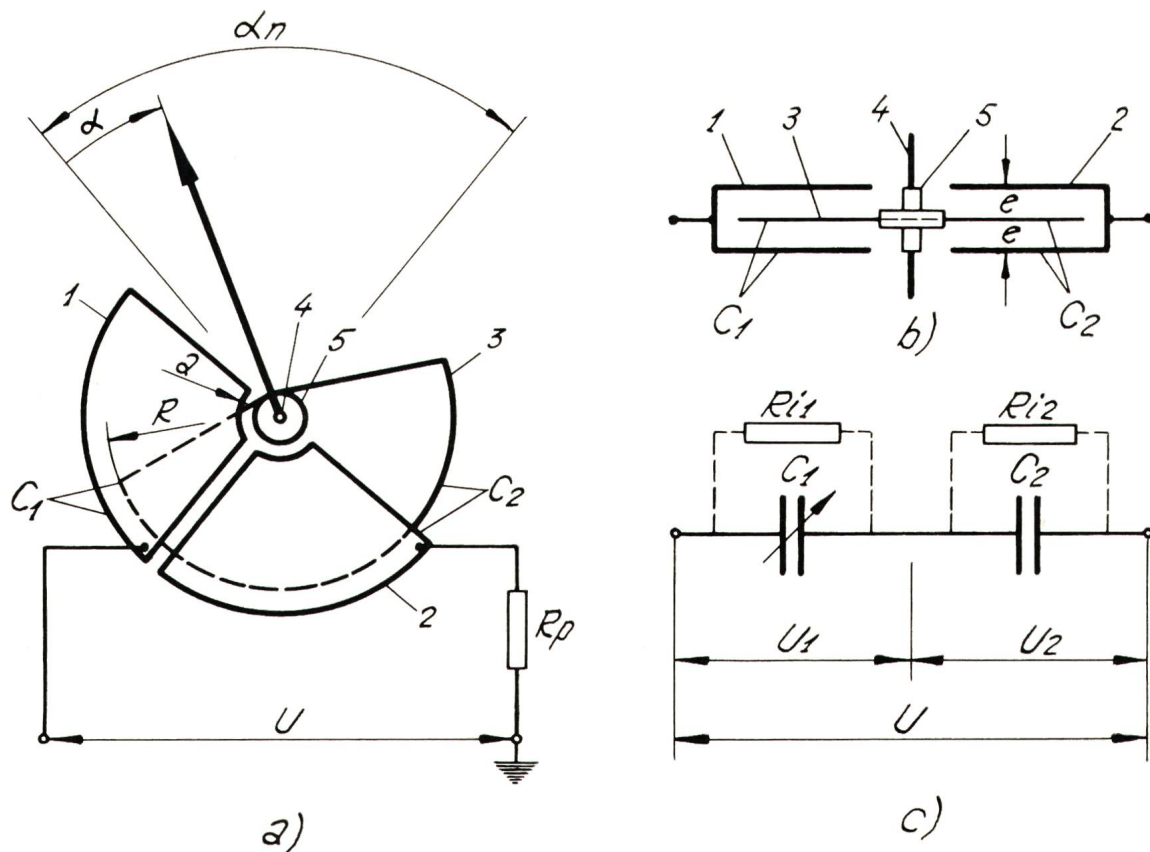


Fig. 5

Voltmètre à variation de tension et un seul couple électrique ( $V_1$ )

- a) schéma de l'ensemble  
b) position des électrodes actives  
c) schéma électrique

$e$  distance entre les électrodes actives  
 $C_1, C_2$  capacités entre les électrodes actives  
 $U_1, U_2$  tensions d'entrée à  $C_1$  et  $C_2$   
4, 5 axe à pivots et le manchon électroisolant  
 $U$  tension à mesurer

Dans la fig. 6 on indique la forme de l'échelle graduée tracée d'après (18) pour  $\beta = 0,75$ . On observe que pour  $m = 0,3 \dots 0,5$  l'échelle est pratiquement linéaire sur 80...90 % de sa longueur puisque sur ces conditions  $v \leq 1,3$ .

Il résulte des relations (12) et (13) que  $dC_1/d\alpha = \text{const}$  et que  $U_1$  dépend de  $\alpha$ ; ce sont ces deux aspects qui constituent le trait principal de la méthode de la variation de la tension. La différence essentielle entre la méthode classique et celle de la variation de la tension consiste dans le fait que, premièrement, la linéarisation de l'échelle graduée se fait en imposant une condition de forme (4), et, deuxièmement, en réalisant des conditions simultanées (12) et (13).

Tandis que pour  $V_K$  des modifications géométriques exigées par (5) sont nécessaires, on utilise pour  $V_1$  une géométrie des électrodes plus simple, constituée uniquement par des arcs de cercle et lignes droites; la modification de la caractéristique de l'échelle se fait, comme il résulte de (21), par la simple modification de l'angle au centre ( $\theta_2$ ) de l'électrode fixe 2, opération technologiquement plus facile que la modification de la courbure de l'électrode mobile de  $V_K$  selon la relation (5).

### 3.2 Le facteur de qualité de Keinath ( $\Gamma_1$ )

est donné par l'expression:

$$\Gamma_1 = \frac{10 \alpha_n W_1}{G_1^{1,5}} \quad (23)$$

où  $W_1$  est défini par (19) et  $G_1$  est le poids de l'organe mobile.

Les poids des parties composantes de l'organe mobile de  $V_1$  et  $V_q$  étant identiques, à l'exception des électrodes mobiles, on peut écrire les relations:

$$G_q = g + g_q$$

$$G_1 = g + g_1$$

où  $g_q$  et  $g_1$  représentent le poids de l'électrode mobile de  $V_q$ , respectivement  $V_1$ . Comme ces derniers sont proportionnels aux angles au centre des électrodes mobiles respectives et que ces angles pour  $V_q$  et  $V_1$  sont  $(\alpha_n + \delta)$  et respectivement  $(\alpha_n + \delta) \cdot (1+b)$ , il en résulte que  $g_1 = g_q (1+b)$ . Quant à  $g_q$ , il résulte des données de construction existantes dans la littérature que pour les voltmètres monocellulaires à amortisseur à air et  $U_n = 0,75 \dots 3 \text{ kV}$ ,  $g_q = 0,4 \dots 0,2 G_q$ . En considérant la moyenne  $g_q = 0,3 G_q$ , on obtient:

$$G_1 \approx (1 + 0,3 b) G_q \quad (24)$$

Si l'on tient compte à présent des relations (19), (22), (24) et en divisant (23) par (1) on obtient la relation:

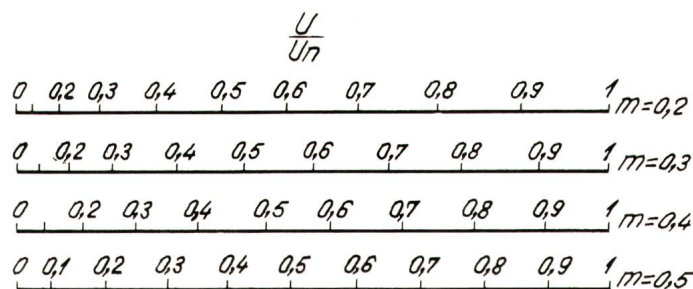


Fig. 6

La forme de l'échelle du voltmètre  $V_1$   
 $m$  paramètre géométrique du voltmètre  
Autres désignations voir fig. 3

$$\begin{aligned} b \leq 1 &\rightarrow \frac{\Gamma_1}{\Gamma_q} \approx \frac{1}{(1+b)(1+0,3b)^{1,5}} \\ b \geq 1 &\rightarrow \frac{\Gamma_1}{\Gamma_q} \approx \frac{1}{b(1+b)(1+0,3b)^{1,5}} \end{aligned} \quad (25)$$

qu'on a représentée graphiquement dans la fig. 7.

On a représenté aussi dans la même figure la courbe  $\nu(b)$ , déduite graphiquement de la fig. 6. En comparant la fig. 4 à la fig. 7 il résulte que pour  $V_1$  l'abaissement du facteur de qualité de *Keinath* est moindre que pour  $V_k$ .

### 3.3 Influence de la résistance de protection

Dans le cas de  $V_1$  la résistance de protection  $R_p$  est destinée à éliminer les effets destructifs de l'arc électrique sur l'électrode mobile s'il y a percement de l'espace entre celui-ci et les électrodes fixes. En ce qui concerne la grandeur de  $R_p$  les essais indiquent que 5 k $\Omega$  pour chaque kilovolt de la tension nominale du voltmètre est suffisant.

De même que pour  $V_k$  l'erreur:

$$\gamma_R \approx -2\pi^2 f^2 C_1^2 R_p^2 \quad (26)$$

est introduite par  $R_p$  aux fréquences élevées.

En attribuant maintenant aux grandeurs de (11) l'indice  $k$  et à celles de (26) l'indice 1 et en divisant ces relations entre elles ( $C_{1K} \approx C_{11}$ ) on obtient:

$$\frac{\gamma_{R1}}{\gamma_{RK}} = \frac{R_{p1}^2}{R_{pK}^2} \quad (27)$$

Comme  $R_{pk} \geq 3...5 R_{p1}$  il résulte que  $\gamma_{R1} = 1/9...1/25 \gamma_{RK}$ , par conséquent, la limite supérieure du domaine des fréquences est considérablement plus élevée pour  $V_1$  que pour  $V_k$ , et la consommation de puissance aux fréquences élevées sur la résistance de protection du premier beaucoup plus réduite.

### 3.4 Influence de la résistance d'isolation

Les relations (13) sont rigoureusement exactes uniquement pour le diviseur de tension capacitif idéal.

Si les résistances d'isolation  $R_{i1}$  et  $R_{i2}$  (fig. 5c) ne sont pas suffisamment grandes et  $f$  descend sous une certaine limite, la tension d'entrée de  $C_1$  est:

$$U_1' = U \frac{C_2}{C_2 + h C_1}$$

et de ce fait dans l'indication du voltmètre apparaît l'erreur:

$$\gamma_{Ri} = \frac{U_1 - U_1'}{U_1} = \frac{h-1}{h + \frac{1}{\psi-1}} \quad (28)$$

où  $\psi$  est donné par (14) et

$$h = \sqrt{\frac{1 + 1/(\omega^2 R_{i1}^2 C_1^2)}{1 + 1/(\omega^2 R_{i2}^2 + C_2^2)}}$$

En développant en série et en considérant  $R_{i1} \approx R_{i2} = R_i/2$  après certains calculs où l'on admet que  $1/(\psi-1) \geq 2$ , on obtient

$$\gamma_{Ri} \geq \frac{1}{1 + 4\pi^2 f^2 C_2^2 R_i^2} \quad (29)$$

où  $R_i$  est la résistance d'isolation mesurée aux bornes du voltmètre.

Pour  $V_1$ ,  $C_2 \geq 3...5$  pF et  $f \geq 30$  Hz (pour des raisons liées à l'inertie de l'organe mobile). Dans cette situation il

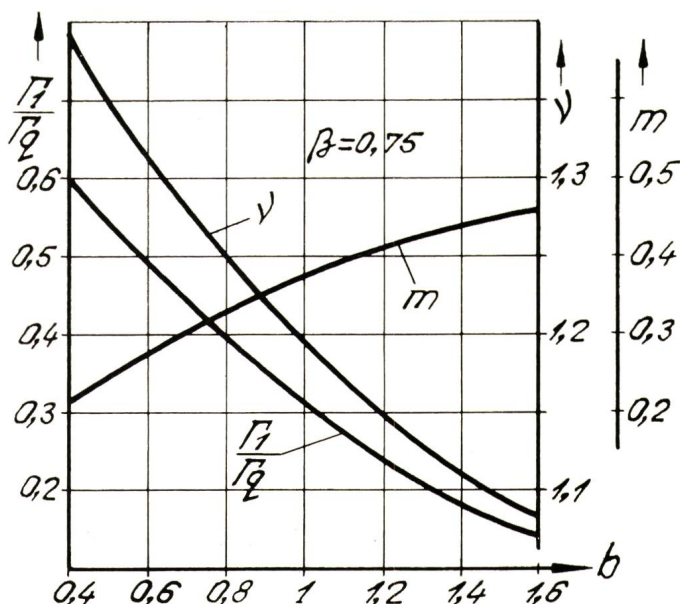


Fig. 7

Corrélations entre les paramètres du voltmètre  $V_1$

$b$  paramètre défini par (17);  $m$  paramètre défini par (21);  $\beta$  coefficient d'utilisation électrostatique;  $\nu$  coefficient de non linéarité de l'échelle;  $\Gamma_1, \Gamma_q$  facteur *Keinath* du  $V_1$  et  $V_q$

résulte de (29) que pour avoir une erreur négligeablement petite, par exemple  $\gamma_{Ri} \leq 0,2\%$ , il faut que  $R_i \geq 10^{11} \Omega$ . Cet ordre de grandeur pour  $R_i$  peut être facilement réalisé en utilisant des électroisolants synthétiques tels le téflon, le polystyrène et le polyéthylène [10; 11].

## 4. Voltmètre à variation de tension ayant deux couples électriques ( $V_2$ )

Le voltmètre  $V_2$  est représenté dans la fig. 8. On observe qu'il a les mêmes parties composantes que  $V_1$ , à l'exception de la capacité  $C_2$  qui est variable; il y a donc les relations:

$$C_1 = C_{10} + K\alpha$$

$$C_2 = C_{20} - K\alpha$$

Il résulte de la fig. 8a que l'angle au centre de l'électrode mobile est constant  $\approx \pi$  et par conséquent les expressions des tensions d'entrée aux électrodes actives (fig. 8c) peuvent être écrites sous la forme:

$$U_1 \approx \frac{(\pi - \alpha) U}{\pi + \delta}$$

$$U_2 \approx \frac{(\delta + \alpha) U}{\pi + \delta}$$

Vu que sur l'organe mobile agissent les couples

$$M_1 = \frac{1}{2} U_1^2 \frac{dC_1}{d\alpha} + \frac{1}{2} U_2^2 \frac{dC_2}{d\alpha} = \frac{K(\pi - 2\alpha - \delta) U^2}{2(\pi + \delta)}$$

$$M_2 = -W_2 \alpha$$

on obtient de la condition  $M_1 + M_2 = 0$ , à la suite des calculs très simples, l'équation de fonctionnement

$$\eta = \frac{\mu^2}{1 + \lambda(1 - \mu^2)} \quad (30)$$

de même que les relations de base pour le calcul des électrodes actives



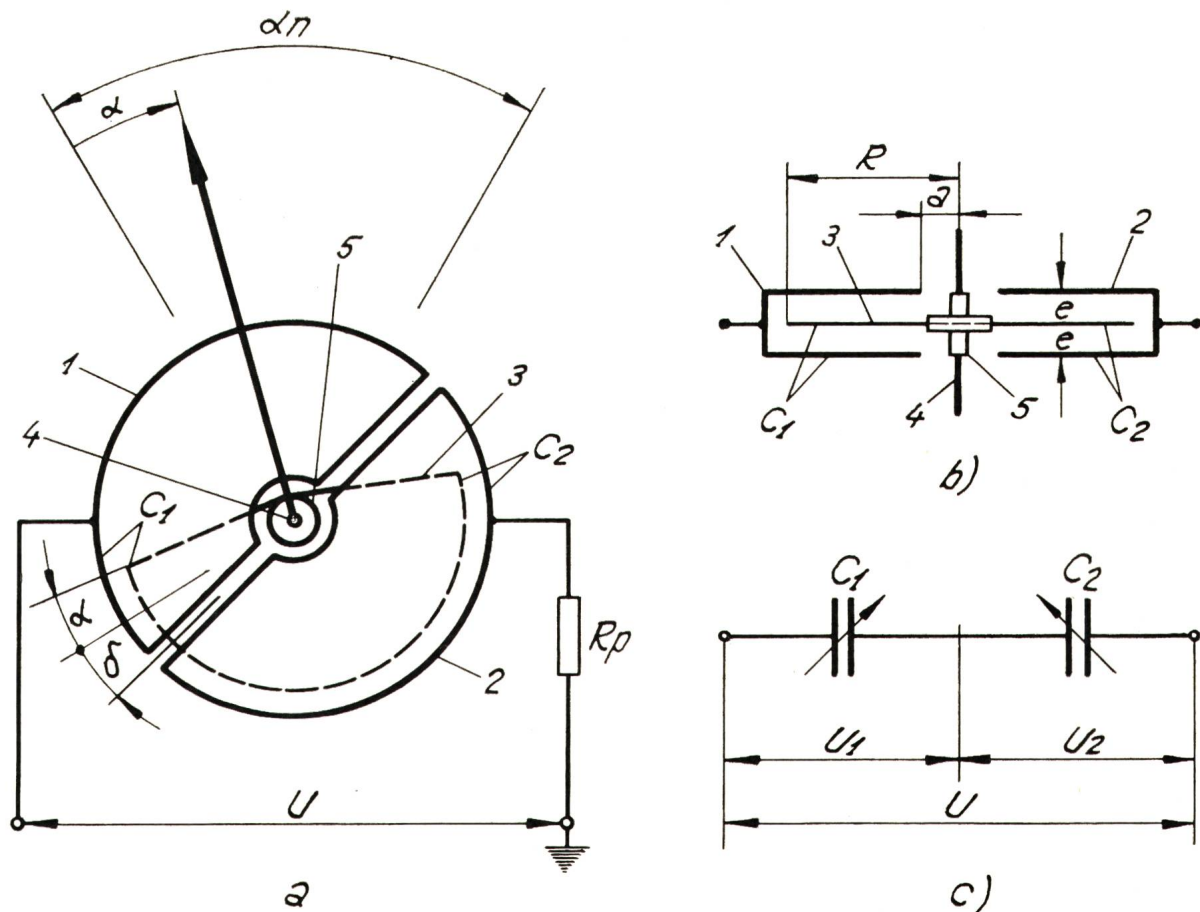


Fig. 8  
Voltmètre à variation de tension ayant deux couples électriques ( $V_2$ )  
Désignations voir fig. 1 et 5

$$W_2 = \frac{\varepsilon E_L U_n R^2 (\pi - 2\alpha_n - \delta)}{2\alpha_n (\pi - \alpha_n)} \quad (31)$$

$$e = \frac{(\pi - \alpha_n) U_n}{(\pi + \delta) E_L}$$

$$\lambda = \frac{2\alpha_n}{\pi - \delta} \quad (32)$$

où

et les autres termes ont la même signification que ci-dessus.

Dans la fig. 9 on a représenté la forme de l'échelle graduée définie par (30). On observe que pour  $\lambda = 0,4 \dots 0,6$  l'échelle est pratiquement linéaire sur 70...80 % de sa longueur, puisque sur les portions respectives  $\nu \leq 1,3$ .

Le facteur de qualité de *Keinath* est donné par l'expression

$$\Gamma_2 = \frac{10\alpha_n W_2}{G_2^{1,5}} \quad (33)$$

où

$$G_2 = g + g_2$$

et où  $g_2$  représente le poids de l'électrode mobile. Vu que son angle au centre est  $\pi$  il résulte que

$$g_2 = g_q \frac{\pi}{\alpha_n + \delta}$$

et par la suite, compte tenant de ce qui on a spécifié à (24) on obtient:

$$G_2 = G_q \left( 0,7 + \frac{0,3\pi}{\alpha_n + \delta} \right)$$

En divisant (33) par (1) on obtient l'expression:

$$\frac{\Gamma_2}{\Gamma_q} \approx \frac{\pi - 2\alpha_n - \delta}{(\pi - \alpha_n) \left( 0,7 + \frac{0,3\pi}{\alpha_n + \delta} \right)^{1,5}} \quad (34)$$

qu'on a représentée graphiquement dans la fig. 10.

On a représenté sur la même figure la courbe  $\nu(\lambda)$  déduite graphiquement de la fig. 9, de même que la courbe  $\alpha_n(\lambda)$  d'après (32). On observe que la possibilité de linéarisation de l'échelle est plus réduite pour  $V_2$  que pour  $V_1$  et, surtout, que  $\alpha_n$  disponible est petit. Aussi  $V_2$  est-il plus convenable en boîtier type profil.

En échange le mécanisme de mesure utilisé pour  $V_2$  s'avère très avantageuse à la construction des voltmètres électrostatiques portables à indicateur optique.

En ce qui concerne l'influence de la résistance de protection  $R_p$  et de la résistance d'isolation, il en est de même que pour 3.3 resp. 3.4.

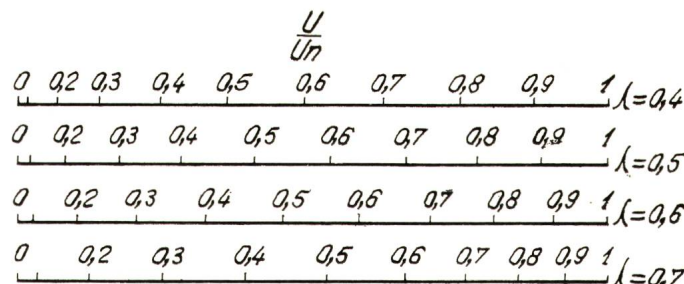


Fig. 9  
La forme de l'échelle du voltmètre  $V_2$   
 $\lambda$  paramètre géométrique du voltmètre  
Autres désignations voir fig. 3

## 5. Comparaison entre la méthode classique et la méthode de la variation de la tension

En comparant les fig. 3, 6 et 9 il résulte que pour  $V_1$  existent approximativement les mêmes possibilités de linéarisation de l'échelle que pour  $V_k$  tandis que pour  $V_2$  elles sont plus réduites. Mais dans le cas de  $V_1$  et  $V_2$ , le ressort antagoniste étant éliminé du circuit électrique, la limite supérieure du domaine des fréquences est approximativement un ordre de grandeur plus élevée que pour  $V_k$  et, de plus, les premières ont une géométrie des électrodes en quelque sorte plus simple.

En échange  $V_1$  et  $V_2$ , fonctionnant sur le principe du diviseur capacitif de tension, exigent une isolation électrique de meilleure qualité.

En ce qui concerne le facteur de qualité de *Keinath*, comme on peut remarquer de la fig. 11 (où l'on a reproduit les courbes de la fig. 4, 7 et 10 en considérant  $\nu$  variable) pour  $\nu \leq 1,3$  il y a approximativement la relation

$$\Gamma_K \approx \Gamma_2 < \Gamma_1 < \Gamma_q$$

Les conclusions théoriques relevées ci-dessus sont confirmées avec une bonne approximation par les données expérimentales.

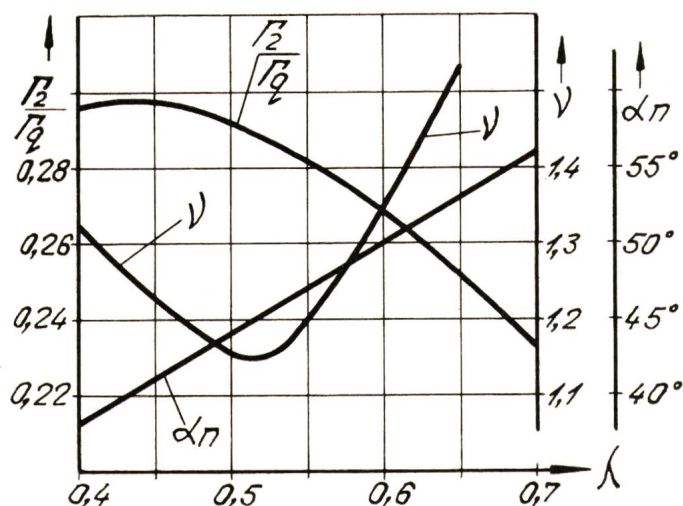


Fig. 10

Corrélations entre les paramètres du voltmètre  $V_2$

Désignations voir fig. 4, 8a et 9

mentales du tableau I où Cl. est la classe de précision [12],  $F$  la limite supérieure du domaine des fréquences et les autres notations ont la signification qu'on retrouve dans le texte.

L'expérimentation des voltmètres  $V_1...V_q$  a été faite en conditions identiques; on a utilisé chaque fois la même partie mécanique et le même boîtier en ne changeant que les électrodes actives. Tous les voltmètres ont été dimensionnés pour  $U_n = 3$  kV,  $R = 30$  mm et  $\nu = 1,2$ ; l'isolation des parties sous tension a été réalisée en polystyrène.

On a réalisé le couple antagoniste du dispositif expérimental non pas avec un ressort spiral mécanique, mais avec un dispositif électrique original — «ressort électrostatique» — où la

Tableau I

Voltmètre	$G$	$\Gamma$	$\nu$	$R_p$ k $\Omega$	$F$ kHz	Cl.
$V_1$	1,2	0,60	1,25	12	250	1,5
$V_2$	1,15	0,45	1,3	12	250	1,5
$V_k$	1,05	0,36	1,2	50	50	1,5
$V_q$	0,95	0,90	—	50	50	1,5

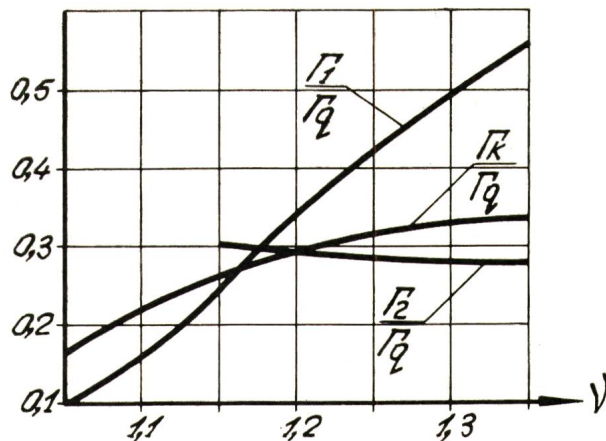


Fig. 11

Corrélations entre les facteurs *Keinath* des voltmètres  $V_K$ ,  $V_1$  et  $V_2$

Désignations voir fig. 4, 7 et 10

constante ( $W$ ) peut être réglée à la valeur exigée, par la simple modification de la tension d'alimentation.

En notant par  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_k$  et  $R_q$  les dimensions radiales des électrodes mobiles pour  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_k$  et  $V_q$  et en comparant ces dimensions par l'intermédiaire des relations (2), (8), (19) et (31) et dans l'hypothèse  $W_1 = W_2 = W_k = W_q$  on obtient la relation:

$$R_q < R_1 < R_2 < R_k$$

qui est en accord parfait avec les résultats expérimentaux.

Des deux voltmètres  $V_1$  et  $V_2$  c'est le premier qui donne des résultats meilleurs en tant qu'appareil où laboratoire lorsqu'on exige une échelle linéaire, tandis que  $V_2$  s'avère avantageux comme appareil de tableau uniquement si l'on exige une échelle contractée à la portion finale (logarithmique).

Les recherches théoriques et les essais expérimentaux indiquent enfin qu'en utilisant les boîtiers normalisés pour les instruments de tableau [13] on peut construire  $V_1$  et  $V_2$  pour des tensions 0,75...15 kV et des fréquences jusqu'à 1,5...0,3 MHz, dans les classes de précision 1,5...1. On peut utiliser ces voltmètres, avec bons résultats, aux installations de courants forts d'audio et radiofréquence (fig. 12).

## 6. Conclusions

a) La linéarisation (uniformisation) de l'échelle du voltmètre électrostatique à aiguille par la méthode classique (modification de la géométrie des électrodes actives), influence d'autant plus négativement sur les dimensions et les performances de l'appareil que la linéarisation requise est meilleure.

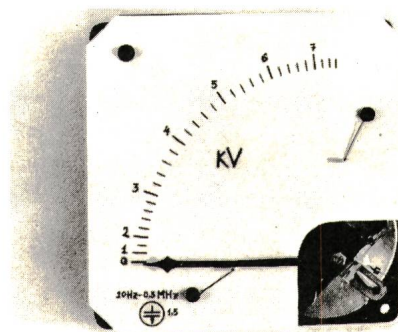


Fig. 12

Voltmètre de tableau du type  $V_1$  construit pour  $U_n = 7,5$  kV

En comparant la forme de l'échelle de ce voltmètre à la forme théorique de la fig. 6 ( $m \approx 0,4$ ) on remarque une bonne concordance



b) A l'aide d'un artifice extrêmement simple: la variation de la tension des électrodes actives, le voltmètre électrostatique naturel (quadratique) peut être linéarisé sans pourtant en modifier la géométrie des électrodes actives.

c) Par rapport à la méthode classique, la méthode de la variation de la tension présente les avantages suivants: un facteur de qualité en quelque sorte meilleur, limite supérieure du domaine des fréquences sensiblement plus élevée et géométrie des électrodes actives plus simples, en gardant toutefois le désavantage d'exiger une isolation électrique de meilleure qualité.

#### Bibliographie

- [1] A. Palm: Elektrostatistische Messgeräte, Karlsruhe, Verlag G. Braun, 1951.
- [2] C. V. Drysdale and A. C. Jolley: Electrical measuring instruments. London, Chapman and Hall, 1952.
- [3] E. H. W. Banner: Instruments électroniques de mesure, Paris, Dunod, 1959.

- [4] P. M. Pflüger und H. Jahn: Elektrische Messgeräte und Messverfahren. 3. Auflage. Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 1965.
- [5] J. Stanek: Technik elektrischer Messgeräte. Berlin, VEB Verlag Technik, 1957.
- [6] A. Schwab: Hochspannungsmesstechnik. Messgeräte und Messverfahren. Berlin/Heidelberg/New York, Springer, 1969.
- [7] W. Niegel: Die Zenerdiode und ihre Anwendung in der Messtechnik. ATM -(1962)321, S. 231...234.
- [8] L. Merz: Grundkurs der Messtechnik. Teil 2: Das elektrische Messen nichtelektrischer Größen. München/Wien, Oldenbourg, 1968.
- [9] A. Täuber-Gretler: Über ein tragbares elektrostatistisches Voltmeter. Bull. ASE 25(1934)21, p. 556...561.
- [10] C. G. Garton: The properties of insulating materials used in instruments. Proc. IEE Part II Power Engineering 98(1951)66, p. 728...737.
- [11] P. F. Bruins: Plastics for electrical insulation. New York/London/Sidney/Toronto, Interscience Publishers, 1968.
- [12] Recommandations pour les appareils de mesure électriques indicateurs et leurs accessoires. Deuxième édition. Publication No. 51 de la CEI. Genève, Bureau central de la Commission Electrotechnique Internationale, 1960.
- [13] A. Palm: Elektrische Messgeräte und Messeinrichtungen. 4. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer, 1963.

#### Adresse de l'auteur:

Dr. ing. Mihai Antoniu, Calea «23 August» nr. 40, bloc B 2, ap. 43, Jassy, Roumanie.

## Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

### Elektrische Maschinen — Machines électriques

#### Schutzeinrichtungen für grosse Elektromotoren

[Nach H. F. Bean und D. D. Stephen: Protection of large a. c. and d. c. drives. Electrical Times 158(1970)11, S. 73...76]

Fehler in Elektromotoren lassen sich in vier Kategorien einteilen, nämlich in Fehler im Versorgungssystem, in Fehler auf der Lastseite, in Fehler des Steuersystems und in Fehler der Hilfseinrichtungen.

Ein wirksamer Schutz für Wechselstrommotoren muss vor allem die Wicklungsisolation vor anhaltend hohen Temperaturen schützen und den Schaden durch einen Isolationsfehler kleinhalten. Diesen Anforderungen entspricht das sehr gebräuchliche Thermorelais, das von der Tatsache Gebrauch macht, dass die Wicklungstemperatur in starkem Masse vom durchfliessenden Strom abhängig ist. Durch Messung des Stromes in Abhängigkeit von der Zeit werden mit diesem Relais kritische Temperaturen in der Wicklung erfasst.

Ferner muss bei Wechselstrommotoren der Synchronismus überwacht werden, um beim Aussertrittfallen auftretende hohe Stromstösse in den Wicklungen zu vermeiden. Dazu dienen Relais, welche die Erregung abschalten oder den Motor vom Versorgungssystem abtrennen.

Bei einem Fehler in einer Wicklung muss der Strom so schnell wie möglich abgeschaltet werden. Die Abschaltbedingungen sind dabei weitgehend von der Art des jeweiligen Fehlers abhängig. Fehler in der Isolation zwischen den Phasen oder zwischen einer Phase und Erde werden beispielsweise mit dem sog. Merz-Price-Schutz erfasst.

Grosse Gleichstrommotoren werden in bezug auf Überströme und Fehler im Kühlsystem durch Thermorelais und Temperaturfühler überwacht oder sind mit statischen Überwachungseinrichtungen zur Ermittlung unzulässiger Stromwerte oder kritischer Laufgeschwindigkeiten versehen.

D. Krause

#### Gleichspannungsmotor mit Thyristorkommutierung durch induzierte EMK

[Nach C. St. J. Lamb: Analysis and testing of a direct-voltage induced-c.m.f.-commutated thyristor motor. Proceedings IEE 117(1970)10, S. 1975...1985]

Die Nachteile der bisherigen Typen der Thyristorkommutierung bei kommutatorlosen Motoren, und zwar die Kommu-

tierung mit Hilfe von Kondensatoren (forced commutation of thyristors) sowie mit Hilfe der Wechselfspannung (natural commutation of thyristors) haben bewirkt, dass ein relativ neuer Typ eines kommutatorlosen Motors mit ortsfestem, eine Anzahl von unabhängigen Spulen aufweisendem Anker, konstruiert wurde. Dieser Typ ermöglicht die Steuerung von grossen kommutatorlosen Motoren mit Hilfe von Thyristoren.

Der Motor weist 24 Serienspulenpaare auf, die parallel zu einer Speisequelle geschaltet werden. Diese parallele Schaltungsmöglichkeit bildet den Hauptunterschied zwischen diesem Motor und den bisher üblichen, bei denen entweder alle Spulen oder mindestens der vorwiegende Teil in Serie geschaltet werden. Der Stator des Motors ist nutzlos; die Spulen sind so gewickelt, dass sie eine Ringwicklung bilden.

Während den Prüfungen wurde der Motor beim Start und bei niedrigen Geschwindigkeiten mit Wechselfspannung, beim normalen Betrieb im Bereiche von 600...3550 U./min mit Gleichspannung gespeist, wobei im zweiten Fall die Kommutierung der Thyristoren über zugehörige Spulen durch die induzierte EMK erfolgte. Die Belastungs- und Geschwindigkeitsprüfungen sowie der voraussehbare Wirkungsgrad von 81 % bei 2,8 HP und 1800 U./min lassen erkennen, dass dieser Motor in einem grossen Geschwindigkeitsbereich befriedigend arbeiten kann. Durch die Erhöhung des magnetischen Flusses über 1,0 Wb/m<sup>2</sup> wird der Wirkungsgrad noch erhöht.

Die beschriebene Konstruktion kann mit Vorteil bei Motoren für grosse Ausgangsbelastungen verwendet werden, wobei aber noch weitere Probleme, wie z. B. die Beseitigung der Anker-Rückwirkung u. dgl. zu lösen sind.

S. Zdarek

### Elektrische Messtechnik, elektrische Messgeräte Métrologie, appareils de mesure

#### Elektronisches Flüssigkeitsstand-Messgerät

[Nach K. Lindström u. a.: A New Instrument for the Measurement of Liquid Level. Rev. Sci. Instr. 41(1970)7, S. 1083...1087]

Eine genaue Bestimmung des Flüssigkeitsstandes ist beispielsweise in der chemischen Industrie häufig erforderlich, so dass Bedarf an einem Flüssigkeitsstand-Messgerät besteht, das in seiner Funktionsweise von Temperatur- und Druckverhältnissen sowie von der Dielektrizitätskonstanten und der elektrischen Leitfähigkeit der Flüssigkeiten weitgehend unabhängig ist.