Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 63 (1972)

Heft: 12

Artikel: Logomètres électrostatiques fonctionnant avec variation de la tension aux électrodes actives

Autor: Antoniu, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915704

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: 10.07.2025

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

Logomètres électrostatiques fonctionnant avec variation de la tension aux électrodes actives

Par *M. Antoniu*, Jassy

621.317.734.082.72

Die Arbeit beschreibt zwei Quotientenmesser mit Veränderung der Spannung an den beweglichen Elektroden zur Verwendung in Megohm-Metern. Diese Quotientenmesser weisen eine vereinfachte Geometrie (nur aus Kreisbogen und Geraden bestehend) auf und ihr Keinath-Faktor ist etwa zweimal grösser als derjenige klassischer elektrostatischer Quotientenmesser. Transistorisierte Megohm-Meter, welche mit diesen Quotientenmessern realisiert wurden, haben einen um den Faktor 1,5...2 kleineren Eigenverbrauch und ihre obere Messgrenze liegt um drei bis vier Grössenordnungen höher als bei Megohm-Metern mit elektromagnetischen Quotientenmessern oder mit Mitkroampèremetern mit Spannungsstabiliserung.

Le travail décrit deux logomètres avec variation de la tension des électrodes actives fonctionnant en schéma de mégohmmètre. Ces logomètres ont la géométrie plus simple (formée uniquement d'arcs de cercle et droites), et un facteur de Keinath d'environ deux fois plus grand que celui du logomètre électrostatique classique; les mégohmmètres transistorisées construits avec ces logomètres ont une consommation de 1,5...2 fois plus petite et la limite supérieure de mesure de 3...4 ordres plus grande que celle des mégohmmètres à logomètre magnétoélectrique ou à micro-ampèremètre et stabilisateur de la tension.

1. Introduction

Le principal avantage des appareils logométriques [1][1]) consiste dans le fait que leur précision n'est pas influencée par les variations, entre certaines limites, de la tension d'alimentation. Aussi, en dépit de l'évolution remarquable des stabilisateurs de tension transistorisés, les logomètres continuent-ils à être employés dans le cadre de certains appareils de mesure de tableau [2] ou bien portatifs.

La condition fondamentale du fonctionnement de n'importe quel logomètre est qu'au moins un de ses couples actifs dépende de l'angle de rotation de l'organe mobile. Cette condition est réalisable dans le cas du logomètre électrostatique [3] par une géométrisation appropriée des électrodes actives, opération qui conduit à un abaissement important du facteur de qualité de *Keinath*; en même temps la technologie devient plus compliquée et coûteuse.

En utilisant la méthode de la variation des tensions aux électrodes actives [4] on a pu réaliser un nouveau type de logomètre, le logomètre électrostatique avec variation de la tension où la dépendance entre les couples actifs et l'angle de rotation de l'organe mobile est réalisée non pas en modifiant la géométrie des électrodes actives, mais en variant leurs tensions d'entrée à l'aide de deux diviseurs de tension capacitive constitués et commandés par le mécanisme logométrique même. Par rapport au logométre classique, le nouveau type se caractérise par une géométrie des électrodes (formée uniquement d'arcs de cercle et lignes droites) plus simple et par un facteur de qualité de *Keinath* sensiblement meilleur.

Dans ce qui suit on présente deux variantes du logomètre électrostatique avec variation de la tension, fonctionnant en schéma de mégohmmètre, avec trois condensateurs et avec ressort électrostatique. Pour simplifier, on les notera par L_3 respectivement L_R; c'est dans le même but qu'on notera le logomètre électrostatique classique [3] par L_K. A ce que nous savons, le logomètre électrostatique avec variation de la tension n'est pas mentionné dans la littérature de spécialité.

Par rapport aux mégohmmètres avec logomètre magnétoélectrique le mégohmmètre utilisant un logomètre électrostatique avec variation de la tension présente les avantages suivants:

a) consommation d'énergie de la source primaire d'approximativement deux fois plus réduite, ce qui est trés important, eu égard à ce que ces derniers temps on constate la généralisation des piles sèches [5];

b) la limite supérieure de mesure avec 3...4 ordres plus grandes, ce qui est aussi très important, car la résistance d'isolation aux installations modernes utilisant l'isolation électrique en résines synthétiques atteint 10^6 MΩ et même plus [6], tandis que la limite supérieure des mégohmmètres à logomètre magnétoélectrique ne dépasse pas $6 \cdot 10^4$ MΩ.

Par rapport aux mégohmmètres avec microampèremètre et stabilisateur de la tension [7] le mégohmmètre utilisant le logomètre avec variation de la tension présente l'avantage d'être plus simple, moins coûteux; sa consommation d'énergie électrique est d'approximativement 50 % plus réduite; son désavantage est d'exiger une tension d'alimentation de 1000 V au moins.

2. Critique du logomètre électrostatique classique (L_K)

2.1 Critères d'appréciation des qualités

Afin d'apprécier les qualités du logomètre électrostatique on utilisera tout d'abord le facteur de qualité de *Keinath*:

$$\Gamma = \frac{10\,\alpha_n\,M_{sm}}{G^{1,5}} \qquad (1)$$

parce que, d'une part, la principale erreur y est celle due aux frottements dans les paliers et, de l'autre part, parce que le mégohmmètre qui inclut le logomètre en discussion est du type portatif. Il faudra considérer par la suite l'angle maximum disponible pour l'échelle graduée, α_M, parce que celui-ci conditionne la longueur de l'aiguille indicatrice; une valeur petit de α_M exige une grande longueur pour l'aiguille indicatrice, ce

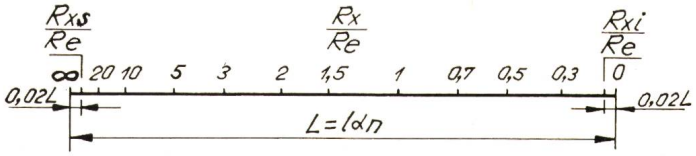

Fig. 1
Forme de l'échelle de L_K
L longueur de l'échelle; l longueur de l'aiguille indicatrice; R_{xi} limite inférieure de mesure; R_{xs} limite supérieure de mesure
Autres indications voir fig. 2

[1]) Voir bibliographie à la fin de l'article.

qui ne reste pas sans influencer négativement sur le paramètre Γ de même que sur le temps d'amortissement [8].

Dans cette relation α_n est l'angle total de l'échelle graduée, M_{sm} la valeur minimum du couple stabilisant spécifique, et G le poids de l'organe mobile du logomètre.

Afin d'apprécier les qualités du mégohmmètre on utilisera les paramètres:

$$d = \frac{R_{xs}}{R_e} \tag{2}$$

$$D = \frac{R_{xs}}{R_{xi}} \tag{3}$$

$$\gamma = \gamma_L + \gamma_c \tag{4}$$

où R_{xs}, limite supérieure de mesure, est la valeur de la résistance à mesurer R_x inscrite sur l'échelle graduée à distance $0{,}02\,\alpha_n$ par rapport au repère ∞ (fig. 1); R_{xi}, limite inférieure de mesure, est la valeur de R_x inscrite sur l'échelle à distance $0{,}02\,\alpha_n$ par rapport au repère zéro, R_e résistance de référence, γ l'erreur fondamentale du mégohmmètre (laquelle détermine la classe de précision de l'appareil), γ_L l'erreur propre du logomètre, et γ_c l'erreur introduite par le circuit de mesure dans l'indication du mégohmmètre. Plus D est grand, plus l'appareil est avantageux parce qu'il a des limites de mesure plus larges; une valeur grande pour d est encore avantageuse, car elle permet de mesurer des résistances R_x grandes en utilisant des résistances de référence petites.

Pour simplifier, dans notre travail on attribuera aux paramètres de qualité Γ, α_M, d, D, γ, γ_L, γ_c l'indice K lorsqu'ils se rapportent à L_K, et les indices *3* et *R* lorsqu'ils se rapportent respectivement à L_3 et L_R.

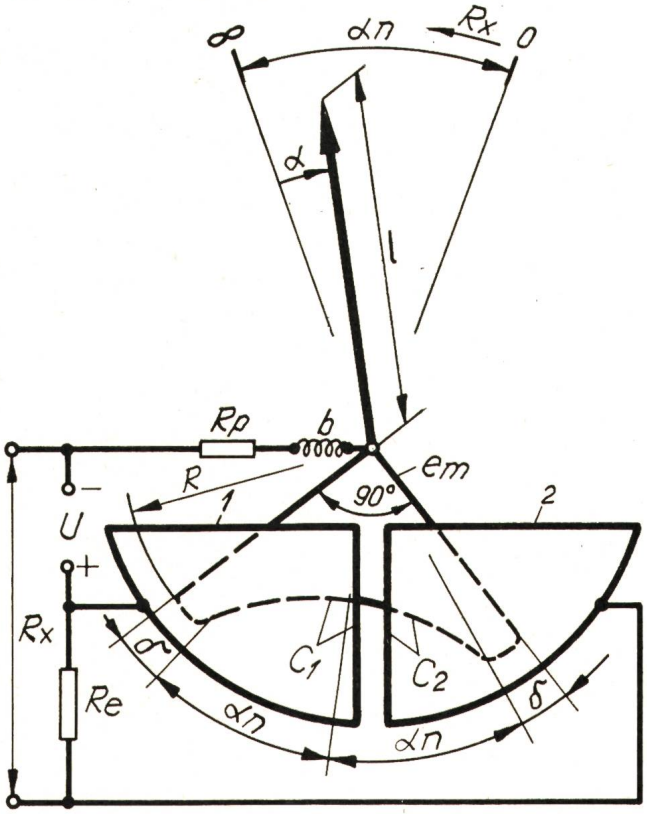

Fig. 2

Logomètre électrostatique classique (L_K)

1,2 électrodes fixes; e_m électrode mobile; R dimension radiale de e_m; α_n angle total de l'échelle; δ angle d'interpénétration entre e_m et *2* quand $\alpha = \alpha_n$; b ressort «sans couple» pour la liaison galvanique à e_m; R_p résistance de protection nécessaire pour limiter le courant dans b en cas de court-circuit entre les électrodes *1,2* et e_m; R_x résistance à mesurer; R_e résistance de référence

Autres indications voir dans le texte

2.2 Equation de fonctionnement

Le schéma de principe du mégohmmètre avec L_K est indiquée dans la fig. 2, où U est la haute tension continue, non stabilisée, d'alimentation du circuit de mesure, et C_1, C_2 les capacités où se développe le couple direct (M_1) dans le sens de croissance de la déviation et respectivement antagoniste (M_2).

A partir de la forme et de la position réciproque des électrodes actives (*1*, *2* et e_m) et compte tenant de la manière dont R_x et R_e sont connectés dans le circuit de mesure, on déduit les relations:

$$\frac{dC_1}{d\alpha} \approx \frac{\varepsilon R^2}{2h}(1-\eta) \qquad \frac{dC_2}{d\alpha} \approx \frac{\varepsilon R^2}{2h}(1+\eta) \tag{5}$$

et respectivement:

$$U_1 = U \qquad U_2 = U\frac{\mu}{1+\mu}$$

à l'aide desquelles on écrit les expressions des couples direct et antagoniste

$$M_1 = \frac{\varepsilon R^2 U^2}{4h}(1-\eta) \qquad M_2 = -\frac{\varepsilon R^2 U^2}{4h}\left(\frac{\mu}{1+\mu}\right)^2(1+\eta) \tag{6}$$

où, en posant la condition d'équilibre pour l'organe mobile

$$M_1 + M_2 = 0 \tag{7}$$

on obtient l'équation de fonctionnement cherchée:

$$\frac{1-\eta}{1+\eta} = \frac{\mu^2}{(1+\mu)^2} \tag{8}$$

qui définit la forme de l'échelle graduée indiquée fig. 1.

Dans les relations ci-dessus ε est la permittivité du diélectrique (air) entre les électrodes actives, h la distance entre les électrodes (voir aussi fig. 4b) et:

$$\eta = \frac{\alpha}{\alpha_n} \tag{9}$$

$$\mu = \frac{R_x}{R_e} \tag{10}$$

2.3 Paramètres de qualité

A l'aide des relations (5) on trouve le couple stabilisant spécifique minimum M_{sm} à partir duquel, en utilisant l'équation (1), on aboutit à l'expression:

$$\Gamma_K = \frac{10\,\varepsilon E_L U R^2}{4 G_K^{1,5}} \tag{11}$$

où

$$E_L = \frac{U}{h} \tag{12}$$

représente l'intensité admissible pour le champ électrique de travail entre les électrodes actives.

On remarque de la fig. 2 que $\alpha_n + \delta \leq \pi/4$ et par conséquent:

$$\alpha_{MK} = \frac{\pi}{4\left(1+\frac{\delta}{\alpha_n}\right)} \tag{13}$$

ce qui indique que l'angle disponible pour l'échelle graduée de L_K est très petit (30...38°).

Compte tenant des équations (2) et (3), il résulte de l'équation (8) $d_k = 49$ et, $D_k = 442$, valeurs satisfaisantes.

Enfin, de l'équation (8) transcrite sous la forme:

$$\alpha = \frac{(R_e^2 + 2\,R_e\,R_x)\,\alpha_n}{R_e^2 + 3\,R_e\,R_x + R_x^2}$$

il résulte qu'à la variation de la résistance de référence R_e (à cause de la variation de la température ambiante, à cause du vieillissement etc.) avec la quantité $\Delta R_e/R_e$ dans l'indication du mégohmmètre apparaît l'erreur

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\delta\,\alpha}{\delta\,R_e} \cdot \frac{R_e}{\alpha}\,\frac{\Delta R_e}{R_e} = \frac{\mu\,(2\,\mu^2 + 2\,\mu + 1)}{2\,\mu^3 + 7\,\mu^2 + 5\,\mu + 1} \cdot \frac{\Delta R_e}{R_e}$$

dont la valeur maximum est

$$\left(\frac{\Delta\,\alpha}{\alpha}\right)_{max} = \gamma_c = \frac{\Delta R_e}{R_e}$$

et par conséquent, conformément à l'équation (4):

$$\gamma_K = \gamma_{LK} + \frac{\Delta R_e}{R_e} \qquad (14)$$

2.4 Critique du logomètre L_K

Les discussions ci-dessus indiquent que L_K présente les désavantages:

a) α_M trop petit;
b) necessité de modeler la géométrie des électrodes actives en vue de satisfaire aux relations de la forme (5);
c) présence de ressort «sans couple» (b) dans le circuit électrique du logomètre;
d) valeur réduite du paramètre Γ_K, comme on peut le constater de l'équation (11) en utilisant les valeurs habituelles pour R, E_L, U et G.

Si l'on garde $dC_1/d\alpha = dC_2/d\alpha =$ constant, voire la géométrie la plus simple, et la dépendance des couples M_1 et M_2 se fait en variant les tensions d'entrée de C_1 et C_2 les désavantages qu'on vient de mentionner disparaissent complètement. C'est ce qu'on appellera justement la méthode de la variation des tensions aux électrodes actives.

3. La méthode de la variation de la tension aux électrodes actives

Est illustrée par la fig. 3a où $C = C_0 + K\alpha$ (C_0, K = const.) est la capacité où se développe le couple moteur (M) et C', qui est constante (où bien varie contrairement à C) et du même ordre de grandeur que la première, sert à varier la tension d'entrée à C selon la relation

$$V = \frac{UC'}{C' + C_0 + K\alpha} = U f(\alpha) \qquad (16)$$

On peut y voir que, bien que $dC/d\alpha =$ const. le couple dépend de l'angle de rotation α de l'organe mobile.

La capacité C' peut être connectée de l'extérieur ou bien peut être formée par le mécanisme de mesure lui-même (fig. 3b); c'est le dernier cas qui convient le plus, parce qu'on élimine les couplages capacitifs parasites de même que l'influence du jeu axial de l'électrode mobile e_m.

La méthode présente l'avantage de permettre la creation de la fonction $M(\alpha)$, en utilisant des électrodes actives en forme de secteur circulaire, qui ont une géométrie plus simple et l'efficience électrostatique maximum à volume minimum du mécanisme respectif.

De plus, la liaison électrique entre l'électrode mobile et la borne fixe respective se fait non pas par un ressort spiral ou par un ressort «sans couple» (fig. 2), mais de manière capacitive, par l'intermédiaire de C', ce qui amène un surcroît de sécurité dans le fonctionnement du mécanisme (fiabilité). En fin, bien que $V < U$, en conditions égales – même dimension radiale de l'électrode mobile, même dépendance $M(\alpha)$, exigée – le couple développé par le mécanisme de la fig. 3b est sensiblement plus grand que celui obtenu au mécanisme classique [4].

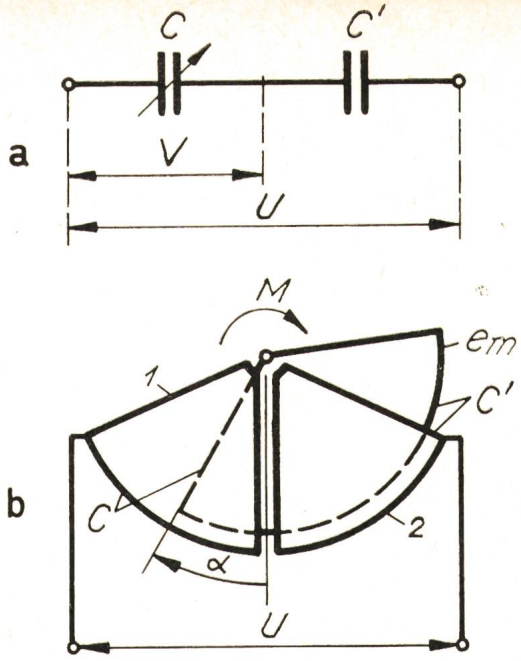

Fig. 3
Méthode de la variation de la tension
a Schéma de principe
b réalisation physique du schéma
U tension d'entrée dans le mécanisme
V tension aux électrodes actives
M couple tournant; *1,2*, e_m et α ont les significations de fig. 2
Autres indications voir dans le texte

La relation (16) est valable pour les tensions alternatives. Dans le cas des tensions continues, comme on peut facilement le démontrer

$$V = \frac{U\,R_c}{R_c + R_c'} = \frac{U_S'}{S + S'} = U f(\alpha) \qquad (16a)$$

où R_c et R_c', sont les résistances d'isolation des condensateurs à air C et C' et S, S' les superficies d'interpénétration entre l'électrode mobile e_m et les électrodes fixes *1* respectivement *2*.

4. Logomètre à variation de la tension et trois condensateurs (L_3)

Le logomètre L_3 fonctionnant en schéma de mégohmmètre est indiqué fig. 4a, où C_1 et C_2 sont les capacités où se développe le couple direct (dans le sens de la croissance de la déviation α) respectivement opposant, et C_3 sert à varier les tensions d'entrée à C_1 et C_2 et, en même temps, à la liaison capacitive entre l'électrode mobile e_m et la borne fixe extérieure respective, en éliminant ainsi le ressort «sans couple» *b* (fig. 2) du circuit électrique du mécanisme logométrique. La haute tension U pour l'alimentation du circuit de mesure est fournie par un convertisseur transistorisé CT.

Quant au principe de mesure, le mégohmmètre à L_3 compare la chute de tension sur la résistance à mesurer R_x à la chute de tension sur la résistance de référence R_e, principe utilisé dans la technique de mesure des résistances très grandes [9].

4.1 *Répartition des tensions sur les capacités* C_1 *et* C_2

Le schéma électrique du logomètre L_3 est indiqué fig. 4c où R_{c1}, R_{c2} et R_{c3} sont les résistances d'isolation des condensateurs à air C_1, C_2 et respectivement C_3. Ces résistances satisfassent aux relations:

$$R_{c1} = \varrho \frac{h}{S_1}, \quad R_{c2} = \varrho \frac{h}{S_2}, \quad R_{c3} = \varrho \frac{h}{S_3} \tag{17}$$

où ϱ est la résistivité de l'air, h la distance entre les électrodes actives (fig. 4b) et:

$$S_1 \approx \frac{R^2}{2}(\alpha + \delta), \; S_2 \approx \frac{R^2}{2}(\alpha_n + \delta - \alpha), \; (r^2 \ll R^2) \tag{18}$$

$$S_3 \approx \frac{R^2 \varphi_3}{2} \tag{19}$$

les superficies d'interpénétration entre e_m et les électrodes *1*, *2*, *3* (fig. 4a) où δ est l'angle d'interpénétration entre *1* et e_m lorsque $\alpha = 0$, ou bien entre *2* et e_m lorsque $\alpha = \alpha_n$ et φ_3 l'angle au centre de l'électrode fixe 3.

Lors du calcul des tensions V_1 et V_2 d'entrée aux capacités actives C_1 et C_2 (fig. 4c) on énonce l'hypothèse que R_x et R_e sont négligeables par rapport à R_{c1} et R_{c2}; cette supposition est vraie si R_x est tout au plus de l'ordre 10^{12} Ω puisque la résistance de l'air est $\varrho \approx 10^{15}$ Ω cm, S_1, S_2, S_3 de quelques cm² et h de quelques mm et par suite R_{c1}, R_{c2} et R_{c3} sont de l'ordre 10^{14} Ω.

Dans cette hypothèse, de la fig. 4c il résulte les relations:

$$V_1 = \frac{U_1 R_{c1}(R_{c2} + R_{c3}) + U_2 R_{c1} R_{c3}}{R_{c1} R_{c2} + R_{c1} R_{c3} + R_{c2} R_{c3}}$$

$$V_2 = \frac{U_1 R_{c2} R_{c3} + U_2 R_{c2}(R_{c1} + R_{c3})}{R_{c1} R_{c2} + R_{c1} R_{c3} + R_{c2} R_{c3}}$$

qui, par association à (17), les équations (18) et (19) deviennent:

$$V_1 = \frac{U_1(\varphi_3 + \alpha_n + \delta - \alpha) + U_2(\alpha_n + \delta - \alpha)}{\varphi_3 + \alpha_n + 2\delta}$$

$$V_2 = \frac{U_1(\delta + \alpha) + U_2(\varphi_3 + \delta + \alpha)}{\varphi_3 + \alpha_n + 2\delta} \tag{20}$$

où:

$$U_1 = \frac{\mu U}{1 + \mu}, \; U_2 = \frac{U}{1 + \mu} \tag{21}$$

et μ a la signification de la formule (10).

4.2 *Equation de fonctionnement*

En partant de l'équation (18) on écrit les expressions des capacités actives:

$$C_1 = \frac{2\varepsilon S_1}{h} = \frac{\varepsilon R^2}{h}(\alpha_n + \delta)$$

$$C_2 = \frac{\varepsilon R^2}{h}(\alpha_n + \delta - \alpha) \tag{22}$$

à l'aide desquelles le couple direct, M_1 (dans le sens de croissance de la déviation α) et le couple antagoniste M_2 peuvent être mis sous la forme:

$$M_1 = \frac{1}{2} V_1^2 \frac{dC_1}{d\alpha} = \frac{\varepsilon R^2}{2h} V_1^2, \quad M_2 = \frac{\varepsilon R^2}{2h} V_2^2 \tag{23}$$

d'où, compte tenant de l'équation (7) on obtient l'équation de fonctionnement cherchée:

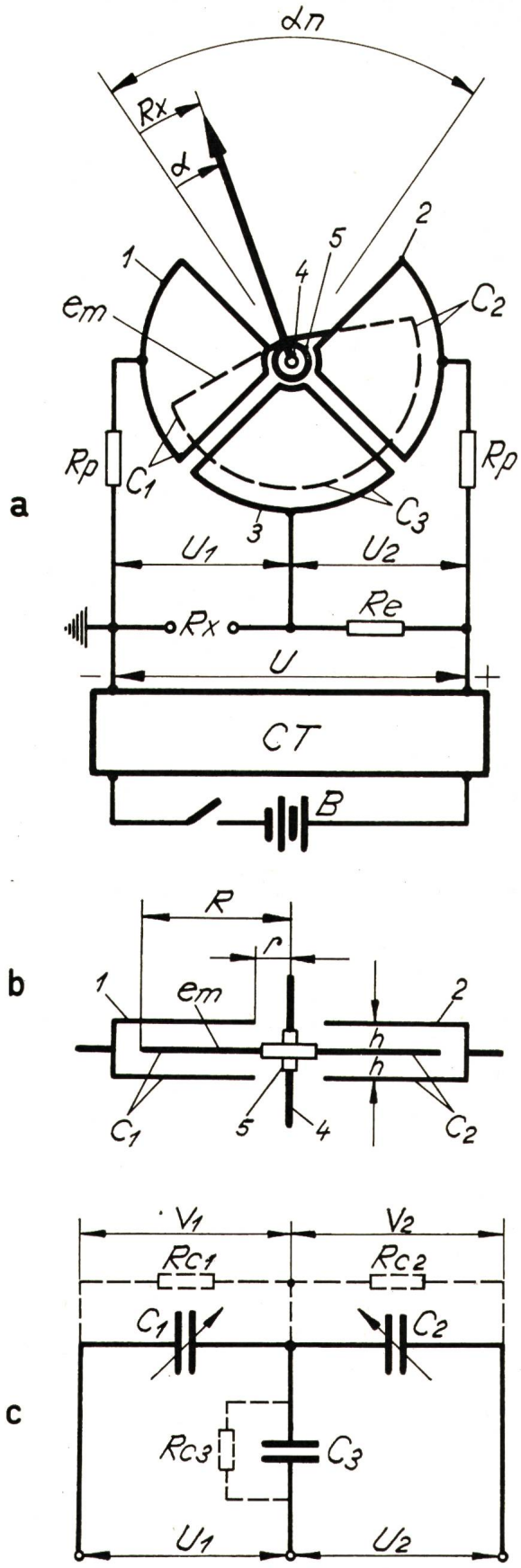

Fig. 4
Logomètre électrostatique à variation de la tension avec 3 condensateurs (L_3)

a Schéma du mégohmmètre à L_3
b position réciproque des électrodes actives
c schéma électrique du logomètre L_3
1,2,3 électrodes fixes; *4* axe de l'organe mobile; *5* manchon électro-isolant de bonne qualité; *h* distance entre les électrodes actives; *CT* convertisseur transistorisé; e_m, α, R et R_p ont la signification de fig. 2
Autres indications voir dans le texte

$$m(2\eta - 1) = \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \tag{24}$$

où

$$m = \frac{\alpha_n}{\varphi_3} \tag{25}$$

est un paramètre du logomètre et η a la signification de l'équation (9).

Fig. 5 on indique la forme de l'échelle graduée, tracée à l'aide de la relation (24). On observe que la distribution des divisions a l'aspect logarithmique, similaire à celui des valeurs rencontrées dans le cas des mégohmmètres [10] et que la distribution la plus avantageuse est pour $m = 1$, lorsque l'équation (24) devient

$$\eta = \frac{\mu}{1 + \mu} \tag{26}$$

Ci-dessous on considère uniquement le cas particulier où L_3 fonctionne selon l'équation (26).

4.3 Expressions de calcul

Le calcul du logomètre L_3 se réduit à déterminer les dimensions R et h (fig. 4b) de même que les angles au centre des électrodes actives.

A partir de l'équation (23) on obtient l'expression du couple stabilisant spécifique (en faisant abstraction du signe):

$$M_s = \frac{\delta}{\delta\alpha}\left(M_1 + M_2\right) = \frac{\varepsilon R^2 U^2}{2h\left(1 + \frac{\delta}{\alpha_n}\right)\alpha_n} \tag{27}$$

à l'aide de laquelle on peut calculer R.

Un calcul simple fondé sur l'emploi des relations (20), (21) et (26) montre que la tension la plus grande entre les électrodes actives apparaît pour C_1 lorsque $\mu \to \infty$ et en même temps, à cause des oscillations de l'organe mobile, α devient zéro. En notant cette tension par V_{1M} on trouve:

$$V_{1M} = \frac{\left(1 + \frac{\delta}{2\alpha_n}\right) U}{1 + \frac{\delta}{\alpha_n}}$$

et par conséquent la distance entre les électrodes actives sera calculée par la relation:

$$h = \frac{V_{1M}}{E_L} = \frac{\left(1 + \frac{\delta}{2\alpha_n}\right) U}{\left(1 + \frac{\delta}{\alpha_n}\right) E_L} \tag{28}$$

où E_L représente l'intensité maximum admise pour le champ électrique de travail entre les électrodes actives, qu'on peut prendre 0,4...0,7 kV/mm [11].

Enfin, si l'on note par φ l'angle au centre de l'électrode mobile e_m et par φ_1, φ_2, φ_3 les angles au centre des électrodes fixes 1, 2 et 3, on obtient de fig. 4a les relations:

$$\varphi = 2(\alpha_n + \delta) \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \alpha_n + \delta \quad \varphi_3 = \alpha_n \tag{29}$$

4.4 Paramètres de qualité

En associant les relations (27) et (28) à (1) en résulte:

$$\Gamma_3 = \frac{5\,\varepsilon E_L U R^2}{\left(1 + \frac{\delta}{2\alpha_n}\right) G_3{}^{1,5}} \tag{30}$$

et, fondé sur une analyse géométrique de la fig. 4a, on obtient:

$$\alpha_{M3} = \frac{2\pi}{3\left(1 + \frac{\delta}{\alpha_n}\right)} \tag{31}$$

Puisque ordinairement $\delta/\alpha_n = 0{,}2...0{,}4$, il résulte de la dernière relation $\alpha_{M3} = 100^0...86^0$, voire l'angle disponible pour l'échelle graduée suffisamment grand.

A partir de la formule (26), conformément à ce qu'on a spécifié à 2.1 on obtient $d_3 = 49$ et respectivement $D_3 = 2380$ pour $\eta = 0{,}02$ et $\eta = 0{,}98$.

Enfin, par l'analyse de la relation (26) transcrite en valeurs absolues on obtient (abstraction faite du signe) $\gamma_{e3} = \Delta R_e/R_e$ et par la suite, conformément à la formule (4):

$$\gamma_3 = \gamma_{L3} + \frac{\Delta R_e}{R_e} \tag{32}$$

4.5 Comparation avec L_k

Vu que les poids des parties composant l'organe mobile de L_k et L_3 sont identiques, à l'exception des électrodes mobiles, on peut écrire les relations:

$$G_k = g + g_k$$

$$G_3 = g + g_3$$

où g_k et g_3 représentent les poids de l'électrode mobile de L_k et respectivement L_3. Mais g_k et g_3 sont proportionnelles aux surfaces des électrodes mobiles respectives et ces surfaces sont $\approx 2/3\,(\alpha_n + \delta)\,R^2$ pour L_k et $R^2\,(\alpha_n + \delta)$ pour L_3, ce qui conduit à la relation $g_3 = 1{,}5\,g_k$. Comme pour L_k, de même que pour les voltmètres électrostatiques [4] on peut considérer $g_k \approx G_k/3$, il en résulte que $G_k/G_3 = 6/7$ et, par conséquent, en divisant la formule (30) par (11) on obtient la relation:

$$\frac{\Gamma_3}{\Gamma_K} = \frac{1{,}6}{1 + \frac{\delta}{2\alpha_n}} \tag{33}$$

Pour $\delta|\alpha_n = 0{,}2...0{,}4$, il résulte de l'équation (33) $\Gamma_3/\Gamma_K = 1{,}34...1{,}46$ ce qui montre qu'en condition égale (mêmes valeurs pour U, E_1 et α_n), L_3 assure un facteur de *Keinath* de 40 %, en moyenne, plus grand que L_k.

De même, en comparant la formule (31) à (13) il en résulte que l'angle maximum disponible pour l'échelle graduée de L_3 est de 2,4 fois plus grand que pour L_k.

Une comparaison des valeurs numériques des paramètres d et D présentée dans 2.3 et 4.4 montre que $d_3 = d_k$ et $D_3/D_k = 5{,}4$ c'est-à-dire L_3 a le domaine de mesure sensiblement plus grand que L_k.

Enfin, puisque dans le cas des logomètres électrostatiques la principale erreur est due aux frottements dans les paliers, et puisque cette erreur est inversement proportionnelle à Γ, en

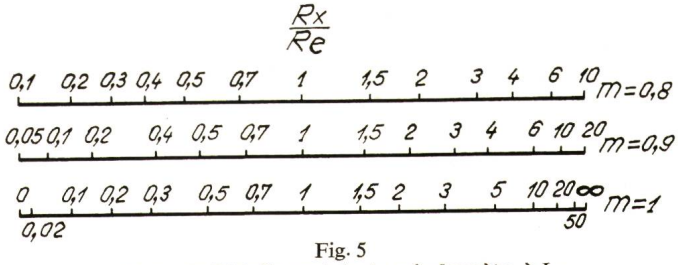

Fig. 5
Forme de l'échelle graduée du mégohmmètre à L_3
m paramètre du logomètre L_3
Autres indications voir dans le texte

raison de la relation (33) on peut affirmer que $\gamma_{L3} < \gamma_{LK}$ et par la suite, en comparant la relation (32) à (14) il resulte

$$\gamma_3 < \gamma_K \tag{34}$$

c'est-à-dire, dans les mêmes conditions, l'erreur fondamentale du mégohmmètre à L_3 est plus réduite que pour le mégohmmètre à L_k.

Les discussions présentées ci-dessus indiquent que sous tous les aspects L_3 est de beaucoup plus avantageux que L_k.

4.6 Exemple de calcul et construction

On présente la réalisation d'un mégohmmètre à L_3 ayant les données suivantes: $U = 2500$ V, $R_{xi} = 5$ MΩ, $R_{xs} = 10^6$ MΩ; $M_s = 3\ \mu$ Nm/rad, $\alpha_n = 80^0$, $\delta = 20^0$.

Il résulte à partir des données du problème que R_{xs}/R_{xi} imposé est plus grand que le paramètre D du logomètre L_3: c'est pour cela qu'on aura besoin de deux degrés de sensibilité, voire deux résistances de référence R_{e1} et R_{e2}. A la suite d'un calcul très simple il résulte $R_{e1} = 2 \cdot 10^2$ MΩ et $R_{e2} = 2 \cdot 10^4$ MΩ, valeurs qui substituées dans les formules (10) et (26) indiquent une superposition entre les deux domaines de mesure de 30 % de la longueur de l'échelle graduée, superposition qui satisfait aux exigences imposées par les standards.

Les résistances R_{e1} et R_{e2} seront du type à pellicule de carbone, l'instabilité dans le temps y étant en-dessous de 0,5 %, et la variation avec la température de ≈ 0,2 %/°C; dans cette situation $\gamma_{e3} = \Delta R_e/R_e = 0{,}9$ % de la longueur de l'échelle graduée.

On adopte comme source de haute tension un convertisseur transistorisé alimenté par des piles sèches de 9 V, dont le calcul et la construction sont connus [12].

Enfin, si l'on adopte $E_L = 0{,}5$ kV/mm, il résulte $h = 4$ mm et respectivement $R = 28$ mm; il résulte aussi de la formule (29) $\varphi = 200^0$; $\varphi_1 = \varphi_2 = 100^0$ et $\varphi_3 = 80^0$.

On présente dans la fig. 6 le mégohmmètre dont la construction repose sur les données ci-dessus, où les notations ont les mêmes significations qu'avant.

L'erreur du logomètre due aux frottements dans les paliers est de $\gamma_{L3} = 0{,}4$ % de la longueur de l'échelle graduée. Par conséquent il résulte de la formule (32) $\gamma_3 = 1{,}3$ % ce qui prouve que l'appareil présente la classe de précision 1,5. Les autres caractéristiques du mégohmmètre construit: le courant absorbé des piles = 100 mA, la longueur de l'échelle graduée = 110 mm, les dimensions de la boîte 200 × 160 × 70 mm, poids 1,5 kg.

La fig. 7 indique un mégohmmètre transistorisé de 2500 V dont le logomètre magnétoélectrique a été remplacé par un autre du type L_3. Par rapport à la situation initiale la consommation à partir des piles a baissé de 1,85 à 0,85 W, la limite supérieure de mesure a augmenté de $2 \cdot 10^3$ MΩ à 10^5 MΩ et le poids de l'appareil s'est réduit de 2,5 à 1,8 kg.

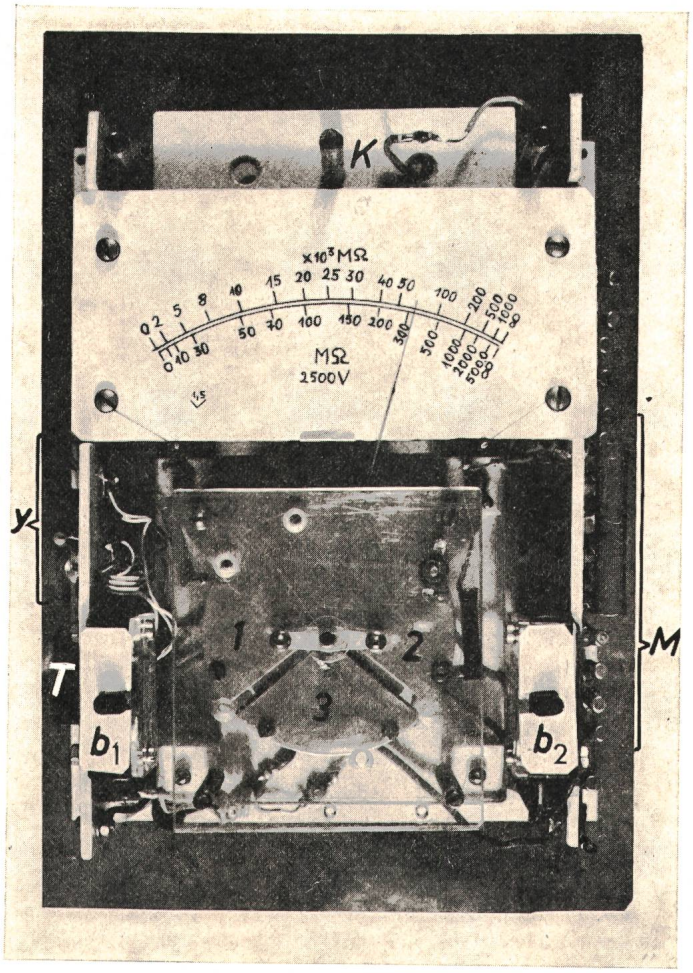

Fig. 6
Mégohmmètre transistorisé à logomètre L_3
b_1 bouton de mise en fonction; b_2 bouton pour le contrôle de la tension des piles; K commutateur des résistances de référence; Y inverteur; T transformateur; M multiplicateur de la tension
Autres indications voir fig. 4a

5. Logomètre à «ressort électrostatique» (L_R)

Dans le cas de ce logomètre le couple opposant est fourni par un mécanisme électrostatique à variation de la tension appelé par nous «ressort électrostatique». A ce que nous savons, un tel dispositif n'est point mentionné par la littérature de spécialité.

5.1 Le «ressort électrostatique»

Les configurations des électrodes et la caractéristique du couple de ce mécanisme sont présentées dans la fig. 8a respectivement 8b. Son schéma électrique est inclus dans la fig. 9c.

Les capacités actives C_3 et C_4 sont donnés par les relations

$$C_3 = C_{30} + K_2\alpha$$

$$C_4 = C_{40} - K_2\alpha$$

où

$$C_{30} = C_{40} \approx \frac{\varepsilon R_2^2}{h}(\alpha_n + \delta) \tag{35}$$

$$K_2 \approx \frac{\varepsilon R^2}{h} \tag{36}$$

et où R_2 est la dimension radiale de l'électrode mobile e_2, h la distance entre celle-ci et les électrodes fixes 1 et 2, α_n l'angle total de rotation de l'électrode e_2, δ l'angle d'interpénétration entre les électrodes 2 et e_2 lorsque $\alpha = \alpha_n$, C_{30} et C_{40} les valeurs des capacités respectives pour $\alpha = 0$ et ε a la même signification que dans les formules (5).

En procédant comme pour 4.1 on trouve que les tensions U_3 et U_4 aux bornes des capacités C_3 et C_4 sont:

$$U_3 = \frac{U(\alpha_n + \delta - \alpha)}{2(\alpha_n + \delta)} \qquad U_4 = \frac{U(\alpha_n + \delta + \alpha)}{2(\alpha_n + \delta)} \tag{37}$$

et, en conséquence, le couple opposant M_2 se développant dans C_3 et C_4 sera:

$$M_2 = -\frac{\varepsilon U^2 R_2^2 \alpha}{2h(\alpha_n + \delta)} = -W\alpha \tag{38}$$

On observe que M_2 est proportionnel à α, étant identique pour la forme au couple antagoniste créée par un ressort spiral mécanique; aussi a-t-on appelé «ressort électrostatique» le dispositif à variation de la tension de fig. 8.

Par rapport au ressort spiral mécanique le «ressort électrostatique» présente l'avantage de permettre la modification de sa «constante» (W) à l'aide de la tension d'alimentation U. Ce dispositif a été utilisé par nous à la construction de certaines relais de tension paramétriques, de même que pour tracer les caractéristiques des couples actifs de certains mécanismes de mesure [4]; ci-dessous on en verra l'utilisation pour la construction d'un logomètre électrostatique-logomètre à ressort électrostatique (L_R).

Le logomètre L_R peut être construit soit en utilisant uniquement la portion OA (fig. 8b) de la caractéristique du ressort, soit les deux portions ($A'OA$). Dans ce qui suit on va considérer le dernier cas, pui qu'il permet de réaliser un angle d'échelle plus grand.

5.2 Equation du fonctionnement et paramètres de qualité

Le logomètre L_R fonctionnant en schéma de mégohmmètre est indiqué en fig. 9a; où C_1 et C_2 sont les capacités dans lesquelles se développe le couple direct M_1, dans le sens de la croissance de la déviation α, et dans C_3 et C_4 le couple antagoniste M_2.

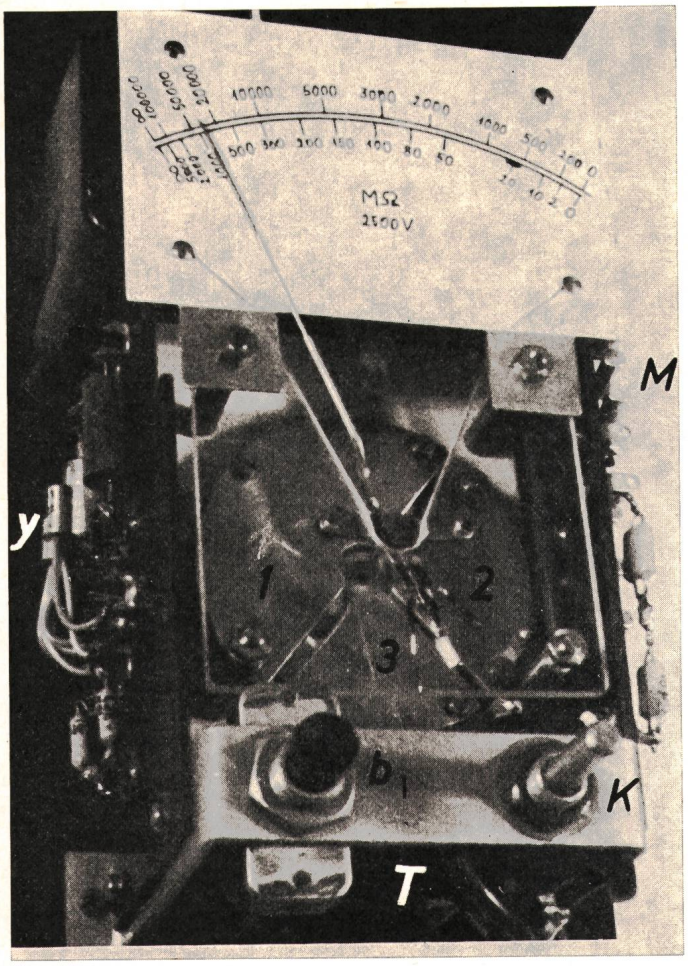

Fig. 7
Mégohmmètre transistorisé dont le logomètre magnétoélectrique a été remplacé à L_3
b_1 bouton de mise en fonction; K commutateur à 3 positions; 2 pour résistances de référence, une pour le contrôle de la tension des piles
Autres indications voir fig. 6

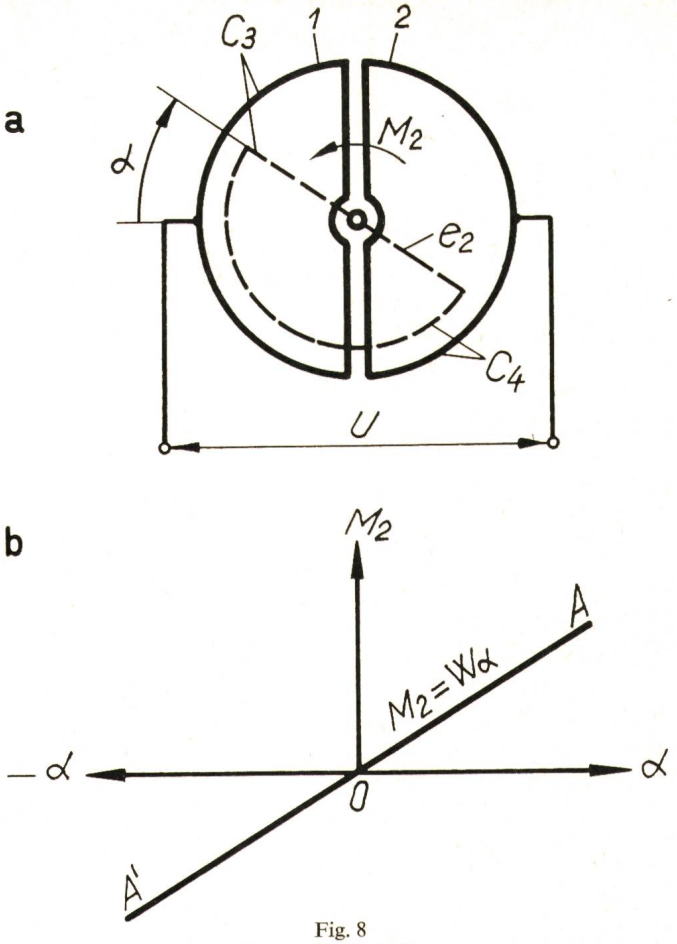

Fig. 8
«Ressort électrostatique»
a schéma de principe; *b* caractéristique du couple; U tension d'alimentation; M_2 couple antagoniste obtenue
Autres indications voir fig. 1

Les premières satisfont aux relations de forme:

$$C_1 = C_{10} + K_1\,\alpha \qquad C_2 = C_{20} - K_1\,\alpha \tag{39}$$

où

$$C_{10} \approx \frac{\varepsilon\, R_1^2\, \delta}{h} \qquad C_{20} \approx \frac{\varepsilon\, R_1^2}{h}\,(\alpha_n + \delta) \qquad (r^2 \ll R^2) \tag{40}$$

sont les valeurs des capacités respectives pour $\alpha = 0$, et

$$K_1 = \frac{\varepsilon\, R_1^2}{h} \tag{41}$$

où ε a la signification de la formule (5) et δ l'angle d'interpénétration entre 1 et e_1 lorsque $\alpha = 0$ (ou entre e_1 et 2 lorsque $\alpha = \alpha_n$).

En vertu de ces valeurs et compte tenant de l'équation (21) on écrit l'expression du couple direct:

$$M_1 = \frac{\varepsilon\, U^2\, R_1^2\,(\mu - 1)}{2\,h\,(\mu + 1)} \tag{42}$$

De même, conformément à la fig. 9a et en procédant comme pour la formule (38), on obtient:

$$M_2 = -\,\frac{\varepsilon\, R_2^2\, U^2\,(2\,\alpha - \alpha_n)}{2\,h\,(\alpha_n + \delta)} \tag{43}$$

d'où, en employant la formule (7) on obtient finalement l'équation du fonctionnement:

$$q\,(2\,\mu - 1) = \frac{\mu - 1}{\mu + 1} \tag{44}$$

où

$$q = \frac{R_2^2}{R_1^2\left(1 + \frac{2\,\delta}{\alpha_n}\right)} \tag{45}$$

est un paramètre du logomètre.

On observe que l'équation (44) est pareil à la formule (24) ce qui indique que L_R a la même forme de l'échelle graduée que L_3 et, par la suite, pour $q = 1$, c'est-à-dire pour:

$$R_2^2 = R_1^2\left(1 + \frac{2\,\delta}{\alpha_n}\right) \tag{46}$$

l'équation du fonctionnement du logomètre L_R est identique à (26).

Pour les discussions qui suivent on va considérer uniquement le cas $q = 1$, parce qu'il offre l'échelle la plus avantageuse; dans ce cas on a les relations évidentes:

$$\begin{aligned} d_R &= d_3 \\ D_R &= D_3 \end{aligned} \tag{47}$$

$$\gamma_{eR} = \gamma_{c3} \tag{48}$$

Conformément aux relations (42) et (43) on obtient l'expression du couple stabilisant spécifique (en faisant abstraction du signe):

$$M_s = \frac{\varepsilon\, E_L\, U\, R_2^2}{h\left(1 + \frac{2\,\delta}{\alpha_n}\right)\alpha_n} \tag{49}$$

qui, associé à la formule (1) conduit à:

$$\Gamma_R = \frac{10\, R_2^2\, E_L\, U}{\left(1 + \frac{2\,\delta}{\alpha_n}\right) G_R^{1,5}} \tag{50}$$

où E_L est défini par l'équation (12).

Les relations (46), (48) et (49) sont fondamentales pour dimensionner le mécanisme L_R. Il reste encore à déterminer les angles φ et φ' de la configuration des électrodes mobiles. Ceux-ci, comme il résulte de fig. 9a, satisfont aux relations:

$$\varphi + \varphi' = \pi \tag{51}$$

$$\varphi = \alpha_n + 2\,\delta \tag{52}$$

Enfin, en admettant $\varphi' \approx \delta$ il résulte de l'équation (51) $\alpha_n + 3\,\delta = \pi$ ce qui conduit à la relation:

$$\alpha_{MR} = \frac{\pi}{1 + \frac{3\,\delta}{\alpha_n}} \tag{53}$$

d'où, pour $\delta/\alpha_n = 0{,}2...0{,}4$ on obtient $\alpha_{MR} = 138...84^0$ — suffisamment grand.

Un mégohmmètre à L_R construit pour $U = 1000$ V, $R_{xi} = 5$ MΩ, $R_{xs} = 10^6$ MΩ, $\alpha_n = 80^0$, $L = 125$ mm, et $M_s = 3\ \mu$ Nm/rad est présenté en fig. 10. Dimensions: 220 × 150 × 50 mm; poids 1,8 kg; classe 1,5; consommation ≈ 0,7 W.

Si l'on procède comme pour 4.5, on écrit la relation où g_R représente $G_R = g + g_R$ le poids des électrodes e_1 et e_2. Comme g_R est proportionnel à la surface de ces électrodes.

$$g_R \sim (\alpha_n + 2\,\delta)\,\frac{R_1^2 + R_2^2}{2}$$

et en admettant

$$\frac{R_1^2 + R_2^2}{2} = R^2 \tag{54}$$

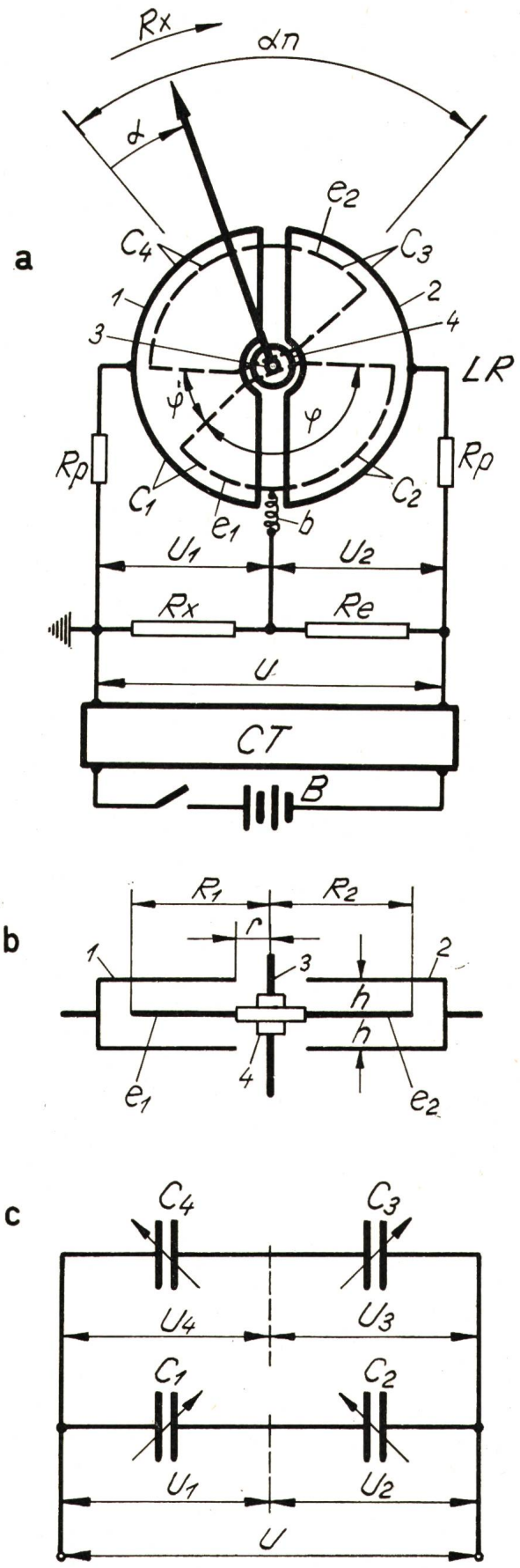

Fig. 9
Logomètre à «ressort électrostatique» (L_R) en schéma de mégohmmètre
a schéma du mégohmmètre; *b* position relative des électrodes actives; *c* schéma électrique de L_R: 1,2,-électrodes fixes; e_1, e_2 électrodes mobiles; R_1, R_2 dimensions radiales des électrodes mobiles; *3* et *4* comme *4* et *5* de la fig. 4b
Autres indications voir dans le texte

on obtient

$$G_R = \left(\frac{\frac{1}{2} - \frac{\delta}{\alpha_n}}{1 + \frac{\delta}{\alpha_n}} + \frac{2}{3} \right) G_K \tag{55}$$

d'où, en divisant l'équation (50) par (11) et compte tenant des équations (46), (54) et (55) on obtient finalement

$$\frac{\Gamma_R}{\Gamma_K} = \frac{1{,}86 \left(1 + \frac{\delta}{\alpha_n}\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(0{,}7 + \frac{\delta}{\alpha_n}\right)^{\frac{3}{2}}} \tag{56}$$

Pour $\delta/\alpha_n = 0{,}2...0{,}4$ de la formule (56) il résulte $\Gamma_R/\Gamma_K = 2{,}4...1{,}9$, ce qui indique que le facteur de qualité de L_R est en moyenne de 2,15 fois plus grand que pour L_K.

Il résulte aussi de la formule (56) que $\gamma_{LR} < \gamma_{LK}$ ce qui conduit conformément à (14), (32) et (48) à la conclusion:

$$\gamma_R < \gamma_K \tag{57}$$

Si l'on compare l'équation (55) à (13) on constate que α_{MR} est, en moyenne, de 2,75 fois plus grand que α_{MK}.

En ce qui concerne d_R, D_R et γ_{CR}, conformément aux formules (46) et (48), les affirmations faites pour d_3, D_3 et γ_{C3} restent valables.

6. Comparaison entre les logomètres L_3, L_R, L_K

Si l'on examine les courbes de fig. 11 tracées conformément aux relations (13), (31), (33), (53) et (56) il résulte que:

$$\Gamma_K < \Gamma_3 < \Gamma_R \tag{58}$$

$$\alpha_{MK} < \alpha_{M3} \approx \alpha_{MR} \tag{58A}$$

De même, si l'on compare les paramètres d et D, conformément à ce qu'on a indiqué à 4.5 et 5.3, il résulte:

$$\begin{aligned} d_K &= d_3 = d_R \\ D_K &< D_3 = D_R \end{aligned} \tag{59}$$

En vertu des inégalités (34), (57) et (58) on peut affirmer aussi que:

$$\gamma_R < \gamma_3 < \gamma_K \tag{60}$$

Enfin, en examinant les figures 2, 4a et 9a, on peut observer que L_3 et L_R assurent un meilleur écranage électrostatique de l'électrode mobile, par rapport à L_K.

Les discussions ci-dessus, de mêmes que celles de 4.5 et 5.3 relèvent que les logomètres L_3 et L_R sont bien plus avantageux que L_K et que L_R a un facteur de qualité de *Keinath* bien supérieur à celui présenté par L_3 — ce qui permet de travailler avec une tension d'alimentation U respectivement plus petite. Mais il nous faut remarquer que L_R comporte dans son circuit électrique le ressort «sans couple» b (fig. 9a), de même que L_K (fig. 1) et la sécurité en fonctionnement s'en trouve en quelque sorte diminuée.

Quant à U, pour avoir un Γ acceptable, il est nécessaire (selon notre expérience) que $U \geqq 2000$ V pour L_K, $U \geqq 1500$ V pour L_3 et $U \geqq 1000$ V pour L_R.

A part les mégohmmètres, les logomètres L_3 et L_R ont donné de bons résultats aussi dans la construction des fréquencemètres de tableau (avec circuits de mesure à résonance de la tension) pour 10...50 kHz, qu'on utilise en vue de mesurer et régler la fréquence des générateurs statiques de puissance dans le domaine audio.

7. Comparaison entre le mégohmmètre avec logomètre électrostatique à variation de la tension et les autres types de mégohmmètres

La multitude des types nous oblige à renoncer à une discussion générale et l'on va considérer trois mégohmmètres: avec logomètre électrostatique du type L_3 ($M\,L3$), avec logomètre magnétoélectrique ($M\,L\,M$) et celui avec microampèremètre (sans amplification) et stabilisateur de la tension ($M\,S\,M$), les trois alimentés par convertisseur transistorisé ($C\,T$) lequel est alimenté à son tour avec des piles sèches (B).

Les schémas de principe des mégohmmètres $M\,L\,M$ et $M\,S\,M$ sont indiqués respectivement fig. 12a et fig. 12b; quant au dernier, on a considéré uniquement le cas de la stabilisation en amont de $C\,T$, plus économique [7].

L'examen des schémas de fig. 4a, fig. 12a et fig. 12b indique, par rapport à $M\,L_3$, l'apparition pour $M\,L\,M$ et $M\,S\,M$ des pertes supplémentaires U^2/R_2 respectivement $U^2{}_B/R_{ST} < U^2/R_2$ (R_{ST} résistance du stabilisateur), lesquelles contribuent de manière substantielle à la croissance des frais d'exploitation (consommation des piles) de ces appareils. De plus, on constate pour $M\,L\,M$ une baisse importante de la tension $I_2\,R_{CT}$ (R_{CT} résistance de sortie du convertisseur) qu'il faut compenser par un nombre plus grand de spires dans le secondaire du transformateur du convertisseur.

Ces conclusions sont confirmées par les données expérimentales.

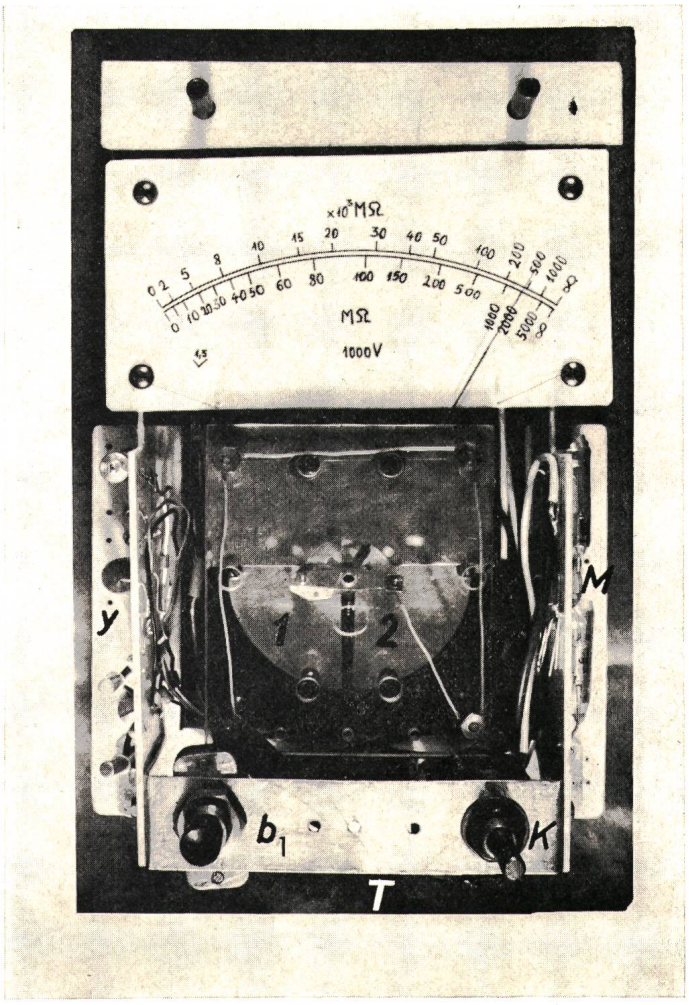

Fig. 10
Mégohmmètre transistorisé à logomètre L_R
Indications voir fig. 7

Afin d'alimenter les appareils en discussion avec une haute tension continue $U = 2500$ V, on a construit un convertisseur transistorisé (CT) du type à contre-temps avec transformateur éleveur et multiplicateur de la tension (quatre degrés), alimenté par des piles séches à $U_B = 8{,}5$ V (à vide 9 V). Il a servi à alimenter successivement $M\,L_3$, $M\,L\,M$ et $M\,L\,S$; dans le dernier cas on a employé un stabilisateur ($S\,T$) du type décrit.

On a constaté que la puissance maximum sollicitée de la source primaire, $U_B\,I_B$ s'élève à 0,96 W pour $M\,L_3$, 1,65 W pour $M\,S\,M$ et 2,05 W pour $M\,L\,M$. En vue de compenser la chute de tension $I_2\,R_{CT}$ ($R_{CT} \approx 6$ MΩ) de ce dernier, il a fallu accroître de 70 % le nombre de spires dans le secondaire du transformateur éleveur.

En ce qui concerne la limite supérieure de mesure, (R_{xs}) exigence majeure actuellement, il est à remarquer que le seuil de sensibilité des logomètres et des microampèremètres utilisés courant pour les mégohmmètres est de 0,25...1 μ A, ce qui indique que pour $M\,L\,M$ et $M\,S\,M$, $R_{xs} \leqq 2{,}5 \cdot 10^3 ... 10^4$ MΩ.

Pour $M\,L_3$, comme on vient de montrer, $R_{xs} \leqq 10^6 ... 10^7$ MΩ (c'est-à-dire de 3 à 4 ordres plus grand).

Enfin, un autre avantage du mégohmmètre avec L_3 ou L_R est présenté par le fait que le sens de croissance de la grandeur R_x sur l'échelle graduée peut être aussi direct (sens horaire), tandis que pour $M\,L\,M$ et $M\,S\,M$ il est toujours inverse.

8. Conclusions

1. Le logomètre électrostatique peut fonctionner même la situation où les capacités actives dépendent linéairement de la déviation ($dC/d\alpha$ = const.) si au moins une d'elles est alimentée par une tension dépendant de la déviation qu'on peut faire à l'aide d'un diviseur de tension capacitif, constitué et commandé par le mécanisme logométrique même.

2. Par rapport à la méthode classique, la variation de la tension dans la construction des logomètres électrostatiques conduit à une simplification de la géométrie des électrodes actives, à une importante croissance du facteur de *Keinath* et de l'angle disponible pour l'échelle graduée; la sécurité de fonctionnement s'y trouve aussi accrue.

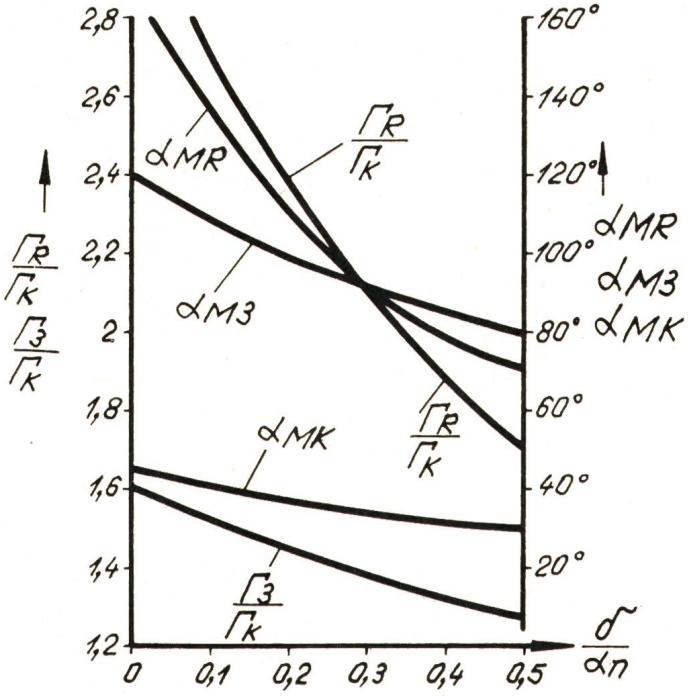

Fig. 11
Courbes des facteurs de qualité de Keinath
Γ_K, Γ_3, Γ_R des logomètres L_K, L_3, L_R et courbes des angles maximum disponibles α_{MK}, α_{M3}, α_{MR}, pour l'échelle graduée

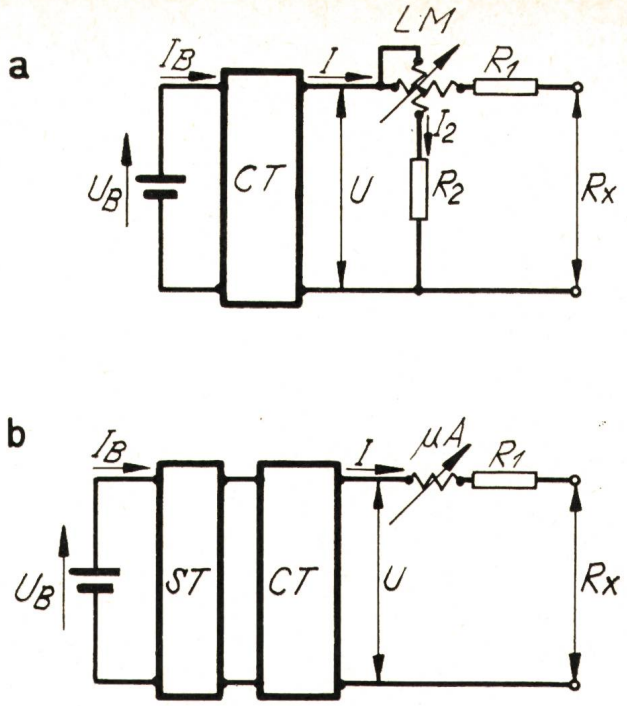

Fig. 12
Mégohmmètres non électrostatiques
a à logomètre magnetoélectrique *(LM)*; *b* à microampèremètre et stabilisateur de tension *(ST)*; *CT* convertisseur transistorisé; *U* tension d'alimentation du circuit de mesure; R_1 et R_2 résistances nécessaires à limiter les courants dans la bobine série et réspectivement dérivation du mécanisme de mesure; U_B tension de la pile d'alimentation; I_B courant débité par la pile; R_x résistance à mesurer

3. Les logomètres électrostatiques avec variation de la tension se prêtent surtout à la construction des mégohmmètres modernes alimentés à partir des piles, puisque la consommation en est pratiquement nulle et ils permettent de mesurer de très grandes résistances (jusqu'à $10^6 ... 10^8$ MΩ). Ces mégohmmètres ont une consommation à partir de la source primaire de deux fois plus réduite par rapport aux mégohmmètres à logomètre magnétoélectrique et de 1,5 plus réduit par rapport aux mégohmmètres à micro-ampèremètre et stabilisateur de tension; la limite de mesure du premier est de 3...4 fois plus grande que pour les deux autres.

Bibliographie

[1] *C. Moerder:* Quotienten- und Produktanzeigegeräte. Nah- und Fernanzeiger des Kreuzspul-, Drehspul-, Drehspulbrücken-, Drehmagnet- und Halltyps. Hamburg/Berlin, R. v. Decker's Verlag G. Schenk, 1963.

[2] *H. F. Grave:* Elektrische Messung nichtelektrischer Grössen. 2. Auflage, Frankfurt a/M., Akademische Verlagsgesellschaft, 1965.

[3] *A. Palm:* Elektrische Messgeräte und Messeinrichtungen. 4. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer Verlag, 1963.

[4] *M. Antoniu:* Nouvelle méthode pour la linéarisation de l'échelle des voltmètres électrostatiques à aiguille. Bull. ASE 62(1971)4, p. 247...254.

[5] *J. Merkel:* Ein Isolationsmesser mit transistorisiertem Gleichspannungswandler. ATM -(1970)417, S. 217...220.

[6] *P. F. Bruins:* Plastics for electrical insulations. New York a. o., Interscience Publishers, 1968.

[7] *A. Haug:* Ein neuer Isolationsmesser. ETZ-B 17(1965)17, S. 561...562.

[8] *A. Täubner-Gretler:* Über ein tragbares elektrostatisches Voltmeter. Bull. ASE 25(1934)21, p. 556...561.

[9] *F. Oehme:* Messung extrem hoher Isolationswiderstände. Bull. ASE 55(1964)21, p. 1080...1082.

[10] *E. A. Frommhold* und *H. Weinert:* Kritische Bemerkungen über Teraohmmeter und Geräte zur Messung von Isolationswiderständen. Elektrie 15(1961)2, S. 56...59.

[11] *C. V. Drysdale* and *A. C. Jolley:* Electrical measuring instruments. 2nd edition, London, Chapman and Hall, 1952.

[12] *D. R. Driver:* Choice of magnetic cores for d. c. converters. Control 11(1967)104, p. 76...80.

L'adresse de l'auteur:
Dr. ing. *Mihai Antoniu,* Calea «23 August» 40, bloc B2, ap. 43, Jassy, Rumänien.