Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 53 (1962)

Heft: 24

Artikel: Aspects de la recherche dans une fabrique suisse de condensateurs

Autor: Boyer, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916997

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: 11.12.2025

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

Aspects de la recherche dans une fabrique suisse de condensateurs [1])

Par *P. Boyer*, Fribourg

061.5 (494) : 621.319.4.006.25

Le genre et les conditions de la recherche dans une fabrique suisse de condensateurs de moyenne importance sont d'abord l'objet de quelques considérations générales. Les condensateurs au papier ont été considérablement améliorés par l'examen systématique de leurs éléments constitutifs, par les essais de compatibilité réciproque des matières de base et par un contrôle intensif de la production courante. L'importance des diélectriques d'imprégnation, solides ou liquides, n'échappe pas aux responsables de la recherche qui leur accordent une attention aussi grande qu'aux films synthétiques dont les propriétés favorables leur permettent, dans certaines conditions, de concurrencer les diélectriques traditionnels. L'auteur mentionne ensuite quelques problèmes de recherche et de développement d'un caractère plus inédit: condensateurs électrolytiques au tantale et au niobium, microminiaturisation. Il cite finalement les résultats d'études relatives à l'une ou l'autre application des condensateurs.

Die Art und die Bedingungen der Forschung in einer schweizerischen Kondensatorenfabrik von mittlerer Bedeutung bilden zuerst den Gegenstand einiger allgemeiner Betrachtungen. Die Papierkondensatoren wurden durch die gegenseitige Verträglichkeit der Ausgangsmaterialien und eine intensive Kontrolle der laufenden Fabrikation bemerkenswert verbessert. Es wird gezeigt, dass den festen oder flüssigen Imprägniermitteln eine ebenso grosse Beachtung eingeräumt werden muss, wie den synthetischen Filmen, deren günstige Eigenschaften unter gewissen Bedingungen eine Konkurrenzierung der klassischen Dielektrika erlauben. Der Verfasser erwähnt hierauf einige Probleme der Forschung und der Entwicklung mit besonderem Charakter: Elekrolytkondensatoren aus Tantal und Niob, Miniaturisierung und Festkörperschaltungen. Schliesslich werden die Resultate von Studien bezüglich der einen oder anderen Anwendung der Kondensatoren zitiert.

Préambule

La recherche pure ou appliquée est devenue un lieu commun depuis que notre génération est entrée dans l'ère de l'atome et de l'électronique qui, non seulement, a ouvert des perspectives inédites et enrichissantes au monde de la science et de la technique, mais encore a remis en question des concepts traditionnels qu'il est souhaitable de reconsidérer et de préciser.

L'idée de recherche est devenue familière à l'homme moderne moyen qui lui associe généralement les images de laboratoires encombrés d'instruments obéissant aux injonctions d'un univers insondable et de réseaux inextricables de tubes et d'appareils en verre, de centres aux proportions fabuleuses qu'il considère comme les nouveaux temples de l'esprit humain. Ces images stéréotypées, livrées par les multiples canaux de l'information actuelle, font oublier une notion fondamentale: l'esprit de recherche qui est en veilleuse dans chaque être doué d'intelligence et de vertu d'attention s'est manifesté depuis que l'homme existe et apparaît aujourd'hui sous des formes beaucoup plus diverses et perfectionnées qu'autrefois. Ainsi, tous les domaines de l'activité humaine sont susceptibles d'être approfondis et étudiés; ils apportent à ceux qui s'adonnent à cette tâche un enrichissement à la fois personnel et transmissible.

Le condensateur électrique est un élément très important en électrotechnique et dans toutes les sciences annexes. Il constitue un sujet de recherche particulièrement intéressant et fertile puisqu'à son principe — deux armatures séparées par un isolant ou diélectrique — peut se rattacher une multitude de variantes suffisamment distinctes les unes des autres pour contraindre le spécialiste qui s'en occupe à connaître non seulement les propriétés de chaque exécution, mais encore chacune de ses parties et les diverses modalités de leur association.

Dans une fabrique de condensateurs, il est donc possible d'entreprendre aussi bien de la recherche pure que de la recherche appliquée. Il va de soi que cette dernière a une part prépondérante et une importance primordiale puisqu'elle doit assurer le déroulement régulier de la fabrication dans le présent et le proche avenir. La recherche spéculative n'en est pas pour autant considérée comme une parente pauvre puisqu'elle doit préparer l'avenir lointain; en outre, le rythme accéléré du monde actuel, qui permet d'affirmer qu'après-demain c'est déjà aujourd'hui, contraint de plus en plus à développer ce secteur de la recherche.

L'évocation précédente est, à quelques retouches près, valable pour une fabrique de condensateurs en Suisse. Deux restrictions importantes ne doivent pourtant pas être omises. La tradition fédéraliste, chère au cœur helvétique, impose à chaque entreprise d'une certaine importance d'acquérir elle-même son expérience et de créer en son sein des laboratoires qui lui assureront ses principes de fabrication et son épanouissement. Le principe d'association, au niveau de la recherche déjà, rencontre souvent des obstacles très difficiles à surmonter et d'origines fort diverses. La collaboration n'est toutefois pas inexistante puisque des initiatives louables ont été dans ce domaine couronnées de succès, mais elle est encore insuffisante pour permettre à des entreprises de moyenne importance, c'est la seconde restriction, de rivaliser, sur le marché international, avec des entreprises tentaculaires extrêmement puissantes et de se tenir par le même fait à la pointe du progrès.

L'activité et les attributions d'un laboratoire d'essais et de développement d'une fabrique de condensateurs de moyenne importance sont aussi multiples que diverses et il serait sans doute fastidieux de les énumérer. L'une ou l'autre ont été choisies dans le but de présenter quelques aspects caractéristiques du sujet. Les condensateurs au papier imprégné rencontrent généralement un accueil plus favorable dans la technique du courant fort que dans le domaine de l'électronique. Cette tendance, toujours plus accentuée, ne doit tout de même pas faire oublier aux anciens utilisateurs de condensateurs au papier les progrès considérables réalisés dans ce secteur depuis quelques années. Plusieurs exemples concrétiseront cette opinion: l'étude de la compatibilité des matériaux avec les huiles minérales et chlorées, l'établissement d'essais d'endurance systématiques, l'étude des diélectriques d'imprégnation utilisables également avec les films synthétiques qui tendent à supplanter le papier dans les petits condensateurs. Les condensateurs au tantale et au niobium utilisés dans les équipements très sollicités appartiennent au développement d'un avenir très prochain, alors que la recherche de nouveaux diélectriques, la microminiaturisation et la technique des micromodules figurent au chapitre de l'avenir lointain. Les applications de certains types de condensateurs, notamment dans le domaine de l'antiparasitage, termineront cet aperçu.

[1]) Conférence donnée lors de la Journée de l'Electronique du 3 septembre 1962, dans le cadre de la «fera» (Schweizerische Fernseh-, Elektronik-, Radio/Phono-Ausstellung) à Zurich.

1. Condensateurs au papier

Les améliorations enregistrées dans ce secteur sont les fruits d'une recherche appliquée intensive. Les nouvelles qualités de papier proposées sur le marché international se caractérisent généralement par une rigidité diélectrique élevée et une tangente de l'angle de pertes particulièrement favorable à température élevée. Le choix délicat de la qualité la plus appropriée à chaque application incombe, en principe, au laboratoire qui se base sur les résultats de ses essais systématiques. Le calcul correct des sollicitations admissibles pour le diélectrique et l'isolation du condensateur n'est toutefois plus guère suffisant pour assurer la stabilité de condensateurs souvent utilisés dans des conditions extrêmement sévères; il faut citer en l'occurrence le cas des condensateurs pour l'amélioration du facteur de puissance des lampes fluorescentes. Il s'avère de plus en plus nécessaire de contrôler l'action de tous les matériaux, isolants ou non, entrant dans la construction des condensateurs, sur les propriétés isolantes de l'imprégnant [1] [2]). Il est intéressant de remarquer que les imprégnants traditionnels tels que les huiles minérales sont plus difficilement pollués que les diphényles chlorés qui ont un pouvoir de dissolution appréciable par suite de leur polarité plus ou moins marquée; par contre, une faible pollution d'un condensateur à l'huile minérale peut entraîner assez souvent de plus graves perturbations en service qu'une contamination relativement avancée d'un condensateur imprégné dans un diélectrique chloré. Il a été établi que la pollution des condensateurs au papier pouvait, entre autres, être évitée par les moyens suivants:

1. Examen consciencieux et systématique de tous les matériaux entrant dans la construction des condensateurs;
2. Examen périodique des éléments reconnus compatibles;
3. Contrôle minutieux des condensateurs fabriqués;

Les deux premiers moyens sont plus ou moins efficaces selon la méthode adoptée. L'extraction au trichloréthylène, proposée par *H. F. Church* [2], paraît au premier abord très intéressante, mais ne mérite pas d'être retenue pour les raisons suivantes: le trichloréthylène est sensible à l'action de la lumière; l'expérience a démontré qu'il était préférable d'examiner la compatibilité d'un matériau avec l'imprégnant qui sera utilisé dans les futurs condensateurs dans des conditions similaires.

L'essai de compatibilité comporte deux phases essentielles: la première consiste en une extraction du matériau considéré dans l'imprégnant choisi, à une température fixée et pendant une durée déterminée. La comparaison des caractéristiques électriques de l'imprégnant souillé et d'un essai parallèle à blanc (imprégnant seul) permet d'estimer, en première approximation, la pollution ou la compatibilité. La deuxième phase comprend un essai sur condensateurs avec des éléments de référence parfaitement contrôlés et le matériau étudié. Le contrôle des condensateurs fabriqués est un examen à posteriori permettant d'assurer que les matériaux de construction des condensateurs ont été choisis adéquatement, que leur qualité se maintient à un niveau acceptable et que les opérations de fabrication se déroulent normalement; cet examen à posteriori consiste en une épreuve d'endurance selon des spécifications proposées ou imposées par l'utilisateur ou en une mesure de l'une ou l'autre caractéristique électrique critique, par exemple, la tangente de l'angle de pertes à température élevée sous différentes contraintes ou la détermination du seuil d'ionisation gazeuse.

Ces propos sont illustrés ci-après par quelques exemples. Les éléments de construction tels que les armatures d'aluminium, les cartons ou plaques d'isolation, les gaines isolantes et les soudures à âme décapante posent des problèmes particulièrement difficiles au constructeur de condensateurs.

Compatibilité de quelques qualités de carton isolant dans une huile minérale sans additifs (500 h à 80 °C) et dans un diphényle tétrachloré (500 h à 100 °C)

Tableau I

Carton isolant	Huile minérale		Diphényle tétrachloré	
	tg δ à 50 Hz et à 80 °C 10^{-4}	Log résistivité à 80 °C Ωcm	tg δ à 50 Hz et à 100 °C 10^{-4}	Log résistivité à 100 °C Ωcm
Essai à blanc	< 2	> 14	< 150	> 12
Qualité IN	500	12	21 000	10
Qualité TR	< 2	> 14	800	12
Qualité SC	< 2	13	7 400	10
Qualité PA	< 2	> 14	2 700	11
Qualité PA tr.	< 2	> 14	3 300	11
Qualité FD	< 2	> 14	650	12
Qualité FD tr.	< 2	> 14	500	12
Qualité AI	< 2	> 14	300	> 12
Qualité AI tr.	< 2	13	3 100	10

Les tableaux I et II comparent la compatibilité de plusieurs qualités de cartons isolants et de gaines de protection colorées dans une huile minérale et un diphényle tétrachloré. Les fig. 1, 2, 3 et 4 illustrent également le principe des essais de compatibilité décrit précédemment. Les diagrammes des fig. 1 et 2 démontrent que le choix des soudures et des armatures d'aluminium est particulièrement important. Les diagrammes des fig. 3 et 4 permettent de comparer des condensateurs de différentes qualités et d'apprécier l'importance des essais de comptabilité en considérant la longévité des lots en présence.

Compatibilité de deux qualités de gaines isolantes colorées dans une huile minérale sans additifs (500 h à 80 °C) et dans un diphényle tétrachloré (500 h à 100 °C)

Tableau II

Gaine isolante	Huile minérale		Diphényle tétrachloré	
	tg δ à 50 Hz et à 80 °C 10^{-4}	Log résistivité à 80 °C Ωcm	tg δ à 50 Hz et à 100 °C 10^{-4}	Log résistivité à 100 °C Ωcm
Essai à blanc	< 2	> 14	< 150	> 12
Non colorée 1	450	12	16 300	10
Non colorée 2	< 2	> 14	1 000	12
Rouge 1	< 2	13	12 200	10
Rouge 2	< 2	13	40 000	9
Bleu 1	< 2	13	8 000	10
Bleu 2	< 2	> 14	2 100	11
Jaune 1	< 2	13	6 000	10
Jaune 2	< 2	> 14	1 800	11

Il est opportun d'ajouter que les laboratoires d'essai doivent être en mesure de contrôler la qualité de la fabrication et des prototypes par des essais relativement simples lorsqu'ils doivent s'appliquer à de grandes séries. Les épreuves d'endurance dont les conditions sont souvent énoncées dans des spécifications ou des normes de référence et quelquefois improvisées en tenant compte de différents facteurs, apportent de précieux renseignements au fabricant de condensateurs. Elles permettent de supprimer l'apparition toujours très désagréable d'avaries erratiques chez l'utilisateur,

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

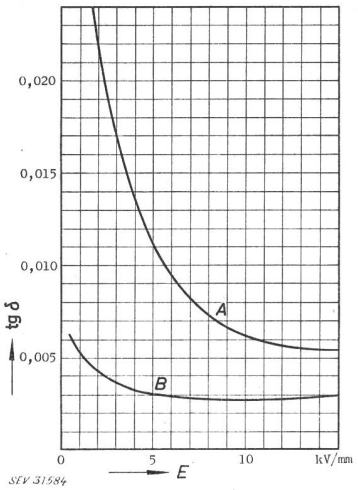


Fig. 1

Influence de la soudure utilisée pour le soudage des connexions dans un condensateur au papier, de densité 1, imprégné dans un diphényle pentachloré

tg $\delta_{100\,°C} = F$ (gradient 50 Hz)

A soudure à âme décapante à base de résine; *B* soudure spéciale

E gradient 50 Hz appliqué lors des mesures

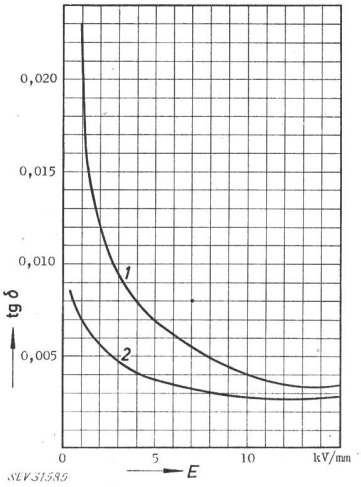


Fig. 2

Influence de la qualité des armatures d'aluminium dans un condensateur au papier, de densité 1, imprégné dans un diphényle pentachloré

tg $\delta_{100\,°C} = F$ (gradient 50 Hz)

1 armatures d'aluminium ordinaires; *2* armatures d'aluminium dégraissées

E gradient 50 Hz appliqué lors des mesures

de déceler de graves défauts de construction ou de fabrication, d'apprécier la stabilité de nouveaux types et, par suite, d'améliorer le niveau général de la qualité en étudiant attentivement les résultats qu'apporte la statistique des essais entrepris.

2. Diélectriques d'imprégnation

L'étude des diélectriques d'imprégnation du papier ou d'autres isolants synthétiques solides revêt une importance primordiale pour une fabrique de condensateurs à l'affût des nouveautés tout en étant soucieuse de ses traditions. L'imprégnation a pour but de remplacer l'humidité (éliminée préalablement par un séchage efficace sous vide, à température élevée), l'air et les gaz par un isolant ayant au moment de l'opération une viscosité très faible, modifiable par la suite, caractérisé par des propriétés électriques très favorables (rigidité diélectrique, résistance d'isolement, pertes diélectriques) et surtout par une constante diélectrique (appelée aussi pouvoir inducteur spécifique ou permittivité) telle que les sollicitations électriques soient convenablement réparties sur les différents éléments du diélectrique complexe. En aggravant les contraintes en service (par une diminution de l'épaisseur du diélectrique, par exemple) et en augmentant le pouvoir inducteur spécifique du diélectrique complexe, il est possible d'accroître la capacité par unité de volume, ou, en d'autres termes, de diminuer sensiblement les dimensions du condensateur. Ces principes ne sont malheureusement pas aussi simples en réalité et ont une portée relativement réduite comme le démontre, par exemple, la fig. 5 établissant une relation entre la constante diélectrique du papier imprégné et celle de l'agent d'imprégnation [3] si bien que dans la plupart des cas, la solution du problème est le résultat d'un compromis.

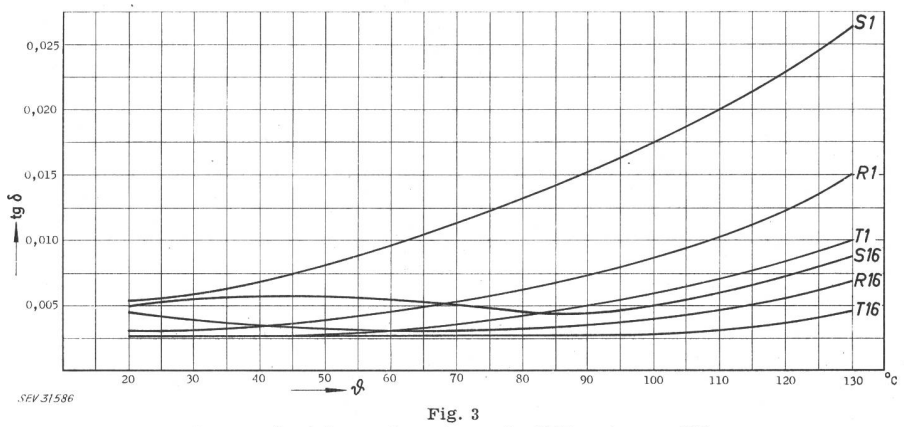


Fig. 3

Comparaison de condensateurs de différentes qualités

Influence de la pollution sur la tangente de l'angle de pertes en fonction de la température ϑ et de la sollicitation

tg $\delta_{50\,Hz} = F$ (température)

R1 Condensateur au papier normal, densité 1,2, imprégné au diphényle tétrachloré, mesure sous 1 kV/mm

R16 Condensateur au papier normal, densité 1,2, imprégné au diphényle tétrachloré, mesure sous 16 kV/mm

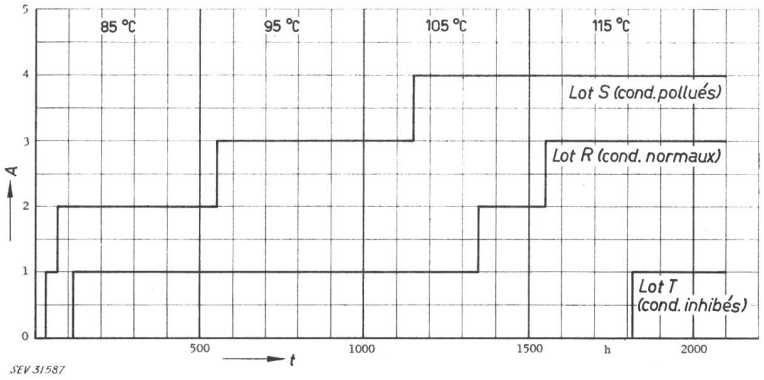
S1 Condensateur pollué au papier normal, densité 1,2, imprégné au diphényle tétrachloré, mesure sous 1 kV/mm

S16 Condensateur pollué au papier normal, densité 1,2, imprégné au diphényle tétraphloré, mesure sous 16 kV/mm

T1 Condensateur au papier inhibé, densité 1,0, imprégné au diphényle tétrachloré, mesure sous 1 kV/mm

T16 Condensateur au papier inhibé, densité 1,0, imprégné au diphényle tétrachloré, mesure sous 16 kV/mm

Fig. 4
Endurance des condensateurs examinés dans la figure 3, sous une sollicitation permanente de 20 kV/mm, 50 Hz, à diverses températures
A avaries; *t* durées d'essai



Il est intéressant de passer en revue les principaux diélectriques d'imprégnation utilisés à l'heure actuelle dans les condensateurs. Les cires microcristallines, comme l'ozokérite, sont des dérives du pétrole qui, comme la vaseline et la paraffine, imprègnent depuis longtemps les condensateurs cylindriques ordinaires, les condensateurs d'antiparasitage et d'autres modèles spéciaux. L'imprégnation des condensateurs au mica et même au polystyrène peut également être envisagée avec ces produits qui sont chimiquement inertes et stables dans une large bande de fréquences. Cependant, de plus en plus, des polymères synthétiques, aux propriétés remarquables, cherchent à supplanter ces imprégnants classiques.

Les huiles minérales sont encore en usage dans un grand nombre de condensateurs (condensateurs de puissance, de filtrage, au papier métallisé, etc.); leurs propriétés électriques, physiques et chimiques constituent un exemple typique de compromis, plus ou moins acceptable selon les applications, sur lequel se greffe encore le problème délicat des inhibiteurs (stabilisateurs, antioxydants, désactivants, etc.). L'étude de ces questions nécessite une collaboration étroite avec les laboratoires spécialisés dans ce domaine, car une fabrique de condensateurs de moyenne importance ne peut se livrer qu'à des examens relativement simples (mesures des caractéristiques électriques et chimiques) sans recourir nécessairement à la spectrographie infrarouge et à la chromatographie en phase gazeuse ou en couche mince.

Les diélectriques chlorés (cires et huiles) trouvent des applications toujours plus nombreuses, car ils sont d'excellents isolants, sont ininflammables, ont un pouvoir inducteur spécifique élevé et sont relativement stables. Les polychloronaphtalènes (cires chlorées) sont généralement utilisés dans les condensateurs cylindriques pour tension continue; dans ce cas, pour éviter l'avarie électrochimique, il est recommandé d'ajouter à la cire une faible proportion de stabilisateur (par exemple de l'anthraquinone). Il en est de même lorsque les huiles chlorées (diphényles polychlorés) sont introduites comme imprégnants dans les condensateurs soumis à une tension continue. Les inconvénients des procédés de stabilisation ne manquent pas: leur rayon d'action est plus ou moins limité selon les conditions d'utilisation du condensateur; ils provoquent une augmentation considérable de la photosensibilité des diélectriques chlorés; ils tendent, en outre, à accroître inutilement le contenu ionique du diélectrique et c'est pourquoi, dans certains cas, l'emploi des diélectriques stabilisés est à déconseiller. L'utilisation des diélectriques chlorés en général, des huiles chlorées ou diphényles polychlorés en particulier, n'est possible qu'au moment où le constructeur de condensateurs est parfaitement renseigné par les laboratoires d'essais et de recherches sur la compatibilité des différents éléments de construction avec ces diélectriques d'imprégnation. Les laboratoires sont également chargés d'examiner tous les produits équivalents en concurrence par la mesure des caractéristiques électriques, accompagnés de quelques contrôles chimiques, permettant de déceler assez aisément la qualité des différents échantillons. Le tabl. III en donne une démonstration. De semblables comparaisons sont encore plus éloquentes avec des diphényles tétrachlorés et surtout trichlorés. Tous ces arguments visent à démontrer que cette nouvelle classe d'imprégnants exige que les opérations d'imprégnation soient soumises à un contrôle sévère et permanent de manière à maintenir les caractéristiques des diélectriques d'imprégnation à un niveau de qualité satisfaisant. L'étude approfondie de dispositifs de mesure des caractéristiques électriques de l'imprégnant et de procédés de régénération périodique de celui-ci constitue un aspect aussi intéressant qu'important de la recherche dans une fabrique de condensateurs.

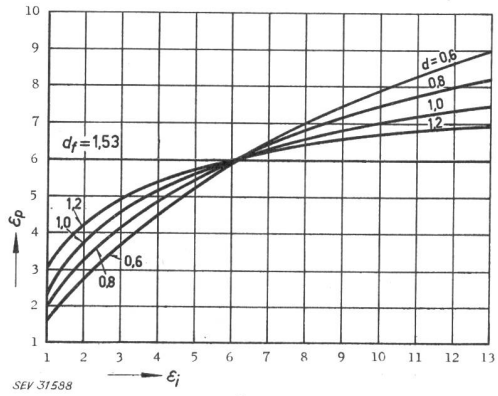


Fig. 5
Relation entre la constante diélectrique du papier imprégné ε_p et celle de l'imprégnant ε_i
d densité du papier; d_f densité de la fibre du papier

Comparaison de trois échantillons de diphényle pentachloré. Mesure des caractéristiques électriques à 100 °C

Tableau III

Echantillon	Constante diélectrique à 50 Hz	tg δ à 50 Hz	Résistivité à 500 V- Ω cm
1	4,35	0,0056	$14 \cdot 10^{12}$
2	4,40	0,0100	$7 \cdot 10^{12}$
3	4,40	0,0420	$4 \cdot 10^{12}$

Les diélectriques liquides tels que l'huile de ricin et les fluides silicones présentent des avantages très différents et peuvent néanmoins trouver une application comme diélectrique d'imprégnation si quelques précautions dictées par la consultation de la littérature spécialisée et l'expérience acquise au cours des essais de principe sont prises en considération.

Cette rapide revue ne saurait s'achever sans mentionner les résines polyesters non saturées, les résines epoxy et les résines silicones qui diffèrent essentiellement des imprégnants précédents par le fait qu'elles passent de l'état plus ou moins fluide à l'état solide d'une façon irréversible sous l'effet de la polymérisation. L'emploi des résines synthétiques comme agent d'imprégnation postule non seulement une solide connaissance des propriétés électriques, physiques et chimiques de ces produits ainsi que leur contrôle régulier, mais encore une révision plus ou moins complète des principes traditionnels de construction des petits condensateurs; les condensateurs ainsi imprégnés sont pratiquement étanches, présentent une résistance considérable aux sollicitations mécaniques et thermiques et ont un encombrement relativement réduit; ils ne peuvent, par contre, être utilisés que sous des tensions continues peu élevées, soit 1000 V au maximum: en effet, le diélectrique complexe résultant de l'imprégnation dans une résine synthétique thermodurcissable est insuffisamment homogène pour supporter sans difficulté des sollicitations électriques poussées; la stabilité de leurs caractéristiques électriques est, au surplus, discutable.

3. Films synthétiques

L'apparition sur le marché des isolants des films synthétiques de faible épaisseur a, de prime abord, laissé supposer que leurs propriétés avantageuses et souvent étonnantes, leur permettraient de détrôner aisément les diélectriques traditionnels comme le papier et le mica. L'expérience n'a pas complètement vérifié cette hypothèse et a plutôt démontré que les films synthétiques ne devaient pas seulement être considérés comme les concurrents des diélectriques traditionnels, mais plutôt comme leurs compléments très bienvenus.

Le polystyrène orienté ou styroflex, l'un des rivaux du mica, a d'excellentes propriétés électriques jusqu'à des fréquences élevées, mais son domaine d'utilisation est considérablement restreint par ses propriétés mécaniques, chimiques et thermiques.

Les films à base de tétrafluoréthylène et d'éthylène-propylène fluoré ont des propriétés absolument remarquables dont quelques-unes figurent au tableau IV. Les films en question sont cependant affligés de quelques défauts particulièrement critiques: inhomogénéités d'autant plus nombreuses que l'épaisseur est plus faible, sensibilité aux décharges ionisantes, particulièrement dans un champ électrique de fréquence élevée, et faible résistance aux radiations.

Comparaison de quelques propriétés de films synthétiques à base d'éthylène tétrafluoré et d'éthylène propylène fluoré à celles de feuilles de mica naturel

Tableau IV

Propriété	Ethylène tétrafluoré	Ethylène propylène fluoré	Mica naturel
Densité	2,1...2,3	2,15	2,65...3,2
Const. diélectrique à 25 °C de 50 Hz à 10 MHz	2,1	2,0...2,2	5,4...7,0
tg δ à 25 °C de 50 Hz à 10 MHz	0,0005 max.	0,0002...0,0008	0,0003...0,0005
Résistivité en Ωcm	$> 10^{15}$	$> 10^{17}$	$> 10^{13}$
Domaine thermique:			
application continue	max.250 °C	max. 200 °C	400 °C
application temporaire	max.300 °C	max. 275 °C	500 °C

Les films polyesters, spécialement ceux à base de téréphtalate de polyéthylène ont rapidement trouvé dans les condensateurs un champ d'application aussi vaste que favorable. Les petits condensateurs cylindriques utilisés dans les équipements électroniques de qualité courante et professionnelle ont tendance à n'avoir pour diélectrique que des films polyesters ou des films à base de polycarbonate. Dans ce secteur, le papier a dû céder le pas aux films synthétiques pour les raisons aussi valables que diverses citées ci-après:

1. Les films synthétiques mentionnés ont des propriétés électriques, mécaniques et thermiques supérieures à celles du papier et, parmi elles, il faut retenir leur rigidité diélectrique sous tension continue, leur facteur de pertes diélectriques à température ambiante, leur résistance d'isolation et leur vaste domaine thermique d'utilisation, soit de —55 °C à +155 °C.

2. Les films synthétiques sont beaucoup moins hygroscopiques que le papier. Les condensateurs qui en sont pourvus offrent donc une meilleure résistance à l'humidité et une plus grande sécurité de fonctionnement.

3. A des prix absolument compétitifs, les condensateurs en films synthétiques ouvrent la voie à des procédés de fabrication nouveaux, n'exigent plus une imprégnation qui ne serait d'ailleurs qu'un remplissage des interstices d'air et de gaz emprisonnés entre les couches de film et simultanément présentent une solution intéressante dans le domaine de la miniaturisation puisqu'ils rendent possible la fabrication de condensateurs avec une seule couche de film de très faible épaisseur (entre 4 et 15 μm) variant selon la tension appliquée et les capacités. Cette performance est absolument irréalisable avec le papier qui se trouve encore affligé d'une trop forte densité de défauts.

4. Les films synthétiques se prêtent assez facilement aux procédés classiques de métallisation par évaporation sous vide d'une couche moléculaire de métal, principalement d'aluminium ou de

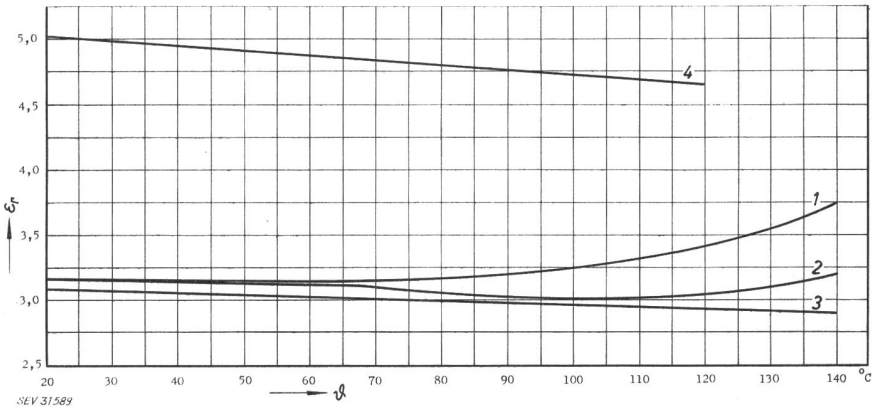
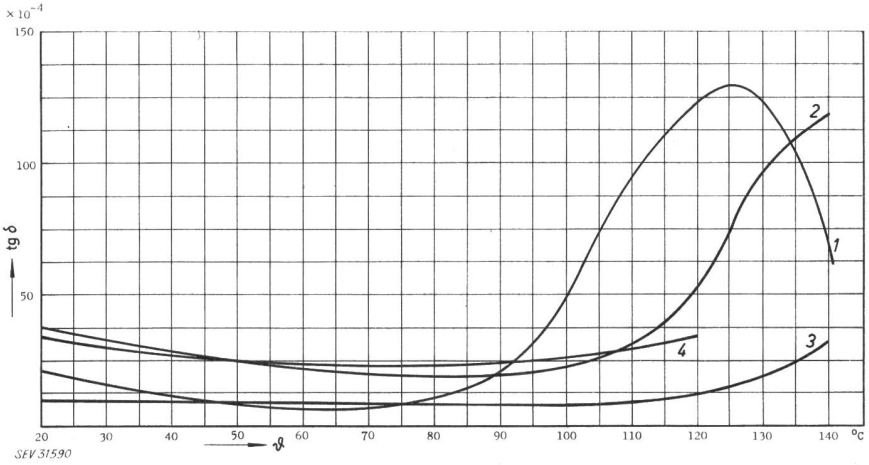


Fig. 6
Comparaison de deux classes de films synthétiques au papier imprégné de densité 1
Constante diélectrique relative à 50 Hz = F (température)
ϑ température; ε_r constante diélectrique relative
1 Film polyester à base de téréphtalate de polyéthylène
2 Film polyester à base de polyéthylène (1,4 — cyclohexane-diaméthanol)
3 Film à base de polycarbonate
4 Papier de densité 1,0 imprégné dans un diphényle pentachloré

Fig. 7
Comparaison de deux classes de films synthétiques au papier imprégné de densité 1
tg δ à 50 Hz = F (température)
Autres explications voir fig. 6



zinc; l'éventail des exécutions couramment proposées aux constructeurs d'appareils et d'équipements électroniques se voit donc avantageusement complété par des types alliant des matériaux de base nouveaux et des méthodes de traitement connues depuis longtemps.

5. Les films synthétiques peuvent finalement être associés aux diélectriques traditionnels comme le papier et former un nouveau complexe aux propriétés inédites et améliorées pour l'un des deux partenaires.

Les films polyesters et les films à base de polycarbonate ont été jusqu'à ce jour principalement utilisés dans les condensateurs soumis à une tension continue; l'étude de leurs propriétés électriques révèle que, dans un champ alternatif, leur comportement n'est pas aussi favorable que dans un champ statique et peut différer sensiblement d'un film à l'autre. Dans ces conditions, une comparaison avec le papier imprégné ne tourne pas toujours au désavantage de ce dernier.

Les fig. 6 et 7 constituent une illustration de ces propos. Les films polyesters à base de téréphtalate de polyéthylène, malheureusement très sensibles à l'hydrolyse, ont une constante diélectrique peu stable en fonction de la température et surtout une tangente de l'angle de pertes très élevée lorsqu'on pénètre dans le domaine de dispersion anormale. Les films polyesters à base de poly (1,4-cyclo-hexane-diméthanol) peuvent être considérés comme une version améliorée du type de film précédent bien qu'à température ambiante, leur facteur de pertes diélectriques soit sensiblement élevé. Les films à base de polycarbonate sont beaucoup plus stables et en dépit d'une épaisseur minima (environ 10 μm) encore élevée par rapport à celle des films en concurrence, ont un avenir prometteur. Jusqu'à 120 °C, le papier imprégné dans un diphényle tétrachloré a un comportement très favorable (il ne faut pas oublier que la tangente de l'angle de pertes du papier sec est notablement inférieure à celle du papier imprégné) et une constante diélectrique élevée et relativement stable.

D'autres films synthétiques sont aussi l'objet d'études systématiques dont les conclusions pourraient ouvrir de nouvelles voies au développement des condensateurs utilisés en électronique et particulièrement aux fréquences élevées. Il faut mentionner à ce propos les films à base de polyéthylène de faible densité et ceux à base de polypropylène orienté qui peuvent, en outre, être soumis à des traitements spéciaux dont les effets se traduisent par une sensible amélioration des propriétés électriques, mécaniques et thermiques. Le tableau V donne un aperçu de quelques propriétés de ces deux sortes de films synthétiques.

4. Condensateurs électrolytiques au tantale et au niobium

Les problèmes discutés jusqu'ici préoccupent, en général, la plupart des fabricants de condensateurs; leur avancement peut être confié à un bureau d'études et à des laboratoires d'essais convenablement équipés. Les condensateurs électrolytiques au tantale et au niobium représentent un domaine relativement nouveau en Suisse, bien que les principes de leur fabrication soient connus depuis fort longtemps à l'étranger et, en particulier, aux Etats-Unis. Les condensateurs à feuilles et à fils agrandis ou non, ayant un électrolyte li-

Propriétés caractéristiques des films à base de polyéthylène (faible densité) et des films à base de polypropylène

Tableau V

Propriété	Film polyéthylène	Film polypropylène
Densité	0,910...0,925	0,89
Elongation en %	200...800	300...500
Domaine thermique	de −50 à +95 °C	de −50 à +125 °C
ε_r à 50 Hz	2,2	2,2
ε_r à 1 kHz	2,2	2,2
ε_r à 1 MHz	2,2	2,2
tg δ à 50 Hz	max. 0,0003	0,0007
tg δ à 1 kHz	max. 0,0003	0,0005
tg δ à 1 MHz	max. 0,0003	0,0002
Résistivité	10^{17} Ω cm	> 10^{15} Ω cm

Les valeurs électriques sont valables aux environs de 25 °C

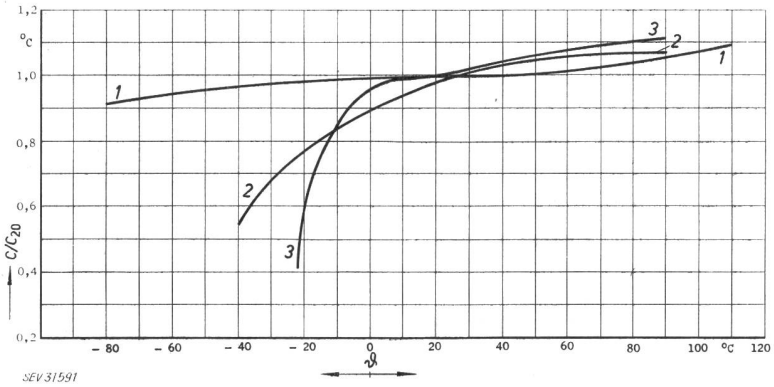


Fig. 8
Comparaison de quelques exécutions de condensateurs électrolytiques
Variation de la capacité à 100 Hz en fonction de la température

C/C_{20} { Capacité rapportée à la capacité mesurée à 20 °C } ϑ température

1 Ta, anode frittée, électrolyte solide
2 Ta, anode frittée électrolyte liquide
3 Al, bande agrandie, électrolyte liquide

quide, dérivent directement des condensateurs électrolytiques à l'aluminium. Actuellement, l'intérêt se porte sur les condensateurs à anode de tantale ou de niobium fritté, ayant un électrolyte solide ou semi-conducteur. L'introduction de cette dernière catégorie de condensateurs dans les circuits à transistors d'appareils professionnels prend chaque année un essor plus considérable. La raison de cette faveur est imputable à leurs propriétés exceptionnelles pour des condensateurs électrolytiques: l'évaporation de l'électrolyte n'est plus à redouter, le domaine thermique d'utilisation peut s'étendre de —80 °C à +125 °C, leur fermeture est réellement hermétique, leur résistance aux vibrations et leur durée de vie au stockage sont particulièrement élevées.

Avant de comparer les caractéristiques des condensateurs au tantale et au niobium et de rappeler quelques propriétés avantageuses des condensateurs au tantale à électrolyte solide, il est bon de situer l'une des positions pouvant être adoptée par une fabrique suisse de condensateurs au sujet de l'exécution de tels condensateurs. La préparation des anodes de tantale ou de niobium fritté présente de sérieuses difficultés qui ne peuvent être résolues que par des spécialistes de la métallurgie des poudres. C'est pourquoi la collaboration étroite des fournisseurs de poudre de métaux rares, des producteurs d'anodes (par frittage) et des fabricants de condensateurs paraît en l'occurrence offrir la meilleure solution à ce problème particulièrement délicat. Cet exemple caractéristique révèle donc l'une des limites auxquelles peuvent se heurter les laboratoires d'essais et de recherches d'une fabrique de condensateurs de moyenne importance.

Les condensateurs au niobium sont plus récents que ceux au tantale; la formation des anodes de niobium

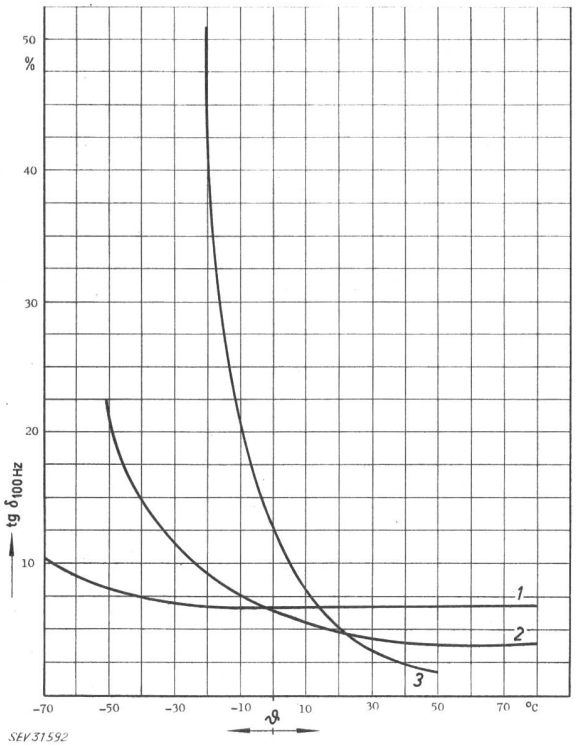


Fig. 9
Comparaison de quelques exécutions de condensateurs électrolytiques
tg $\delta_{100\ Hz}$ en fonction de la température ϑ
Autres explications voir fig. 8

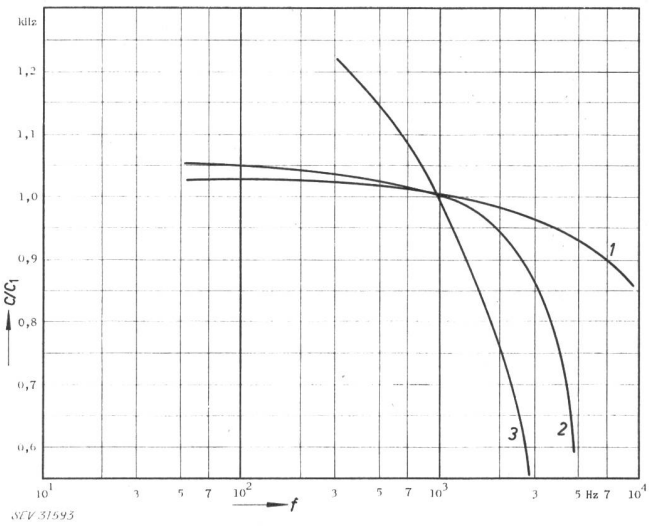


Fig. 10
Comparaison de quelques exécutions de condensateurs électrolytiques
Variation de la capacité à 25 °C en fonction de la fréquence
C/C_1 { Capacité rapportée à la capacité mesurée à 1 kHz } ; f fréquence
Autres explications voir fig. 8

et de tantale s'effectue dans des conditions différentes; la rigidité diélectrique des anodes de niobium est supérieure à celle des anodes de tantale alors que leur capacité spécifique et leur facteur de pertes diélectriques sont pratiquement équivalents. Les condensateurs au niobium sont finalement moins sensibles aux radiations ionisantes que les condensateurs au tantale.

Des essais systématiques (fig. 8, 9 et 10) ont démontré que les condensateurs à anodes de tantale fritté, à électrolyte solide, étaient plus stables que ceux à électrolyte liquide et considérablement supérieurs aux condensateurs électrolytiques à feuille d'aluminium agrandie.

5. Les nouveautés, la miniaturisation poussée et la technique des micromodules

Sous ce titre, il faut évoquer les perspectives d'avenir qui sont extrêmement attirantes et qui ne figurent encore qu'au dossier «Projets» dans un laboratoire de recherche d'une fabrique suisse de condensateur. Avant d'aborder le fond du sujet, il est souhaitable de le situer dans le contexte des réalisations présentes. Le tableau VI en donne un aperçu rapide. A côté des notions généralement connues de capacité spécifique, de charge spécifique, figure un «indice de performances» qui complète les données précédentes et se définit

Comparaison de quelques types courants de condensateurs. Capacité et charge spécifiques, indice de performance. Valeurs maxima
Tableau VI

Type de condensateur	Domaine thermique moyen °C	Capacité spécifique µF/cm³	Charge spécifique µC/cm³	Indice de performance µC·°C/cm³
Papier	−25 à +100	0,2	15	1 300
Papier métallisé	−25 à + 85	0,25	40	4 000
Film polyester	−40 à +125	0,15	25	3 000
Film polyester métallisé	−40 à +125	0,50	75	6 500
Mica	−40 à + 85	0,2	15	900
Polystyrène	−25 à + 70	0,01	2	250
Electrolytique Al	−40 à + 70	400	1200	150 000
Electrolytique Ta	−85 à +100	350	2000	350 000

Coefficient d'occupation des éléments électriques selon la technique et le genre de montage

Tableau VII

Année	Technique	Genre de montage	Eléments/cm³
1955	traditionnelle	Câblage sur chassis. Montage d'éléments distincts	0,5
1958	circuits-imprimés	Suppression du câblage = automatisation relative du montage d'éléments distincts Exemple: un émetteur de poche de 24 éléments et 4 transistors dans un volume de 40×10×6 mm	2 à 15
1959	micromodules à 1 dimension	Empilage de plaquettes portant chacune un élément distinct	20 à 50
1960	micromodules à 2 dimensions	Empilage de plaquettes portant chacune plusieurs éléments distincts	$\geqq 10^4$
1961	micromodules à 3 dimensions	Empilage de plaquettes portant chacune un ensemble d'éléments indistincts mais ayant une fonction définie: circuit oscillant, étage d'amplificateur, etc.	$\geqq 10^4$

comme le produit de la capacité spécifique du domaine thermique et de la tension nominale maxima applicable dans le domaine en question.

Au cours de ces dernières années, la demande en condensateurs est devenue toujours plus importante et suit une courbe ascendante quelque peu inquiétante puisqu'elle dépasse largement, dans certains cas, les cadres normaux d'une production même poussée. Simultanément, les exigences touchant non seulement la qualité des exécutions courantes, mais encore les caractéristiques fondamentales des condensateurs se font toujours plus pressantes et multiples. En contre-partie, l'utilisation de diélectriques nouveaux, la plupart du temps synthétiques, permet d'obtenir des résultats inattendus: propriétés électriques très favorables, stabilité dans un domaine thermique étendu et dans une gamme de fréquences très large, techniques et procédés de fabrication inédits.

L'exigence la plus impérieuse est, sans aucun doute, la recherche, poussée souvent jusqu'à l'exagération, de la miniaturisation et, depuis la réalisation des projets de l'astronautique et de la balistique moderne, de la microminiaturisation. En Europe, et plus spécialement en Suisse, il faudrait maintes fois s'interroger si cette réduction considérable des dimensions des pièces détachées n'est pas davantage dictée par un souci de conformité à une mode, sans doute valable dans certaines conditions, plutôt que par la nécessité, comme de nombreux cas l'ont effectivement révélé.

Le tableau VII donne une idée approximative du coefficient d'occupation ou de la densité des éléments électriques selon la technique en usage et le genre de montage.

Les dernières nouveautés citées exigent de la part des laboratoires de recherches des fabriques de pièces détachées des efforts considérables, la réunion et la collaboration d'un personnel technique hautement qualifié et une adaptation rapide à des techniques absolument nouvelles; il faut citer, en particulier, celle de l'évaporation sous un vide poussé de substances telles que la cryolithe (Na_3AlF_6) ayant une constante diélectrique de 6,0 (n = 1,36), le fluorure de magnésium (MgF_2) ayant une constante diélectrique de 5,0 (n = 1,38), le monoxyde de silicium (SiO) ayant aussi une constante diélectrique de 5,0 (n = 1,90) et le sulfure de zinc (ZnS) ayant une constante diélectrique élevée 7,0 (n = 2,37).

Il est certain que la technique des micromodules n'est pas aussi avancée en Europe qu'aux Etats-Unis et que seuls les laboratoires convenablement équipés peuvent aborder ce problème difficile.

Une fabrique de condensateurs de moyenne importance peut toutefois prévoir l'étude des micromodules à une dimension sans rencontrer de trop grands obstacles. Cette étape doit être considérée comme l'un des aboutissements des recherches entreprises depuis longtemps sur la métallisation du papier et des films plastiques et, plus récemment, sur les diélectriques à base de laques métallisées ou non, avec ou sans support.

6. Applications des condensateurs

Les laboratoires d'essais et de recherches s'intéressent également aux applications les plus diverses des condensateurs de fabrication courante et de leurs prototypes. Les conclusions de ces études conduisent assez souvent à la création de nouveaux modèles et constituent une information très appréciée par les utilisateurs. Deux exemples seront mentionnés, l'un se rapportant aux condensateurs à gaz comprimé, l'autre aux condensateurs d'antiparasitage.

Les condensateurs au gaz comprimé sont la plupart du temps utilisés en haute fréquence dans la construction des émetteurs de puissance, mais sont de très précieux auxiliaires comme étalons dans les laboratoires; par leurs caractéristiques techniques, ces condensateurs se situent entre les condensateurs étalons à air dont la tension de service ne dépasse guère 2000 V et les condensateurs de faible capacité construits pour des tensions de 100 à 500 kV. Le principe de construction est le même que celui des condensateurs utilisés dans les émetteurs. La figure 11 représente la coupe schématique d'un condensateur au gaz comprimé et le tableau VIII présente quelques caractéristiques techniques d'un étalon. Le gaz utilisé comme diélectrique est généralement l'azote, plus rarement l'hexafluorure de soufre (SF_6); les laboratoires d'essais étudient actuellement les propriétés d'autres sortes de gaz.

Caractéristiques techniques d'un condensateur étalon au gaz comprimé

Tableau VIII

Tangente de l'angle de pertes jusqu'à la tension nominale: $< 1 \cdot 10^{-5}$
Variation de la capacité en fonction de la pression: $< 6 \cdot 10^{-4}$/kg/cm²
Variation de la capacité en fonction de la température: $< 5 \cdot 10^{-5}$/°C
Résistance d'isolation: $> 10^{12}\ \Omega$
Pression de service: 20 kg/cm²

Le problème de l'antiparasitage joue un rôle de plus en plus important en électrotechnique et en haute fréquence; il préoccupe aussi bien les constructeurs d'appareils de tout genre, de moteurs, de générateurs,

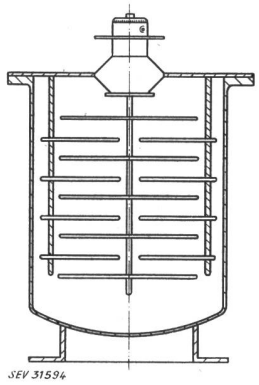


Fig. 11
Condensateur au gaz comprimé
Coupe schématique

d'interrupteurs que les installateurs. L'éclairage par lampes fluorescentes, par exemple, a provoqué, à ses débuts, un accroissement sensible des perturbations radiophoniques. Son extension a donc nécessité la mise au point d'un système efficace de déparasitage; par des essais consciencieux et méthodiques [4], il a été possible de mettre au point expérimentalement des filtres dont le schéma peut dans certains cas correspondre à celui qui est représenté sur la fig. 12 et dont l'efficacité est démontrée par un graphique.

7. Conclusions

Les aspects de la recherche qui viennent d'être évoqués sont donc aussi divers que multiples. Il va sans dire qu'ils ont une importance plus ou moins grande selon les circonstances, les fluctuations de la conjoncture économique et les disponibilités en personnel, en installations et en temps.

La part accordée à la recherche appliquée et au contrôle est incontestablement supérieure à celle qui est réservée à la recherche spéculative dont les avantages ne peuvent être recueillis qu'à plus ou moins longue échéance. La préparation de l'avenir n'est cependant pas laissée au hasard: la documentation apportée par la littérature, les échanges de vue et d'expériences lors des congrès nationaux et internationaux, la participation à des comités d'étude et de travail groupant des spécialistes éminents, l'étroite collaboration avec les clients et les fournisseurs expérimentés constituent des bases d'orientation extrêmement précieuses.

Sous tous leurs aspects, les travaux de recherche effectués dans une fabrique de condensateurs sont d'une importance capitale, car ils permettent aussi bien de satisfaire la clientèle la plus exigeante que de suivre le rythme prodigieusement rapide des réalisations scientifiques et techniques de l'époque actuelle.

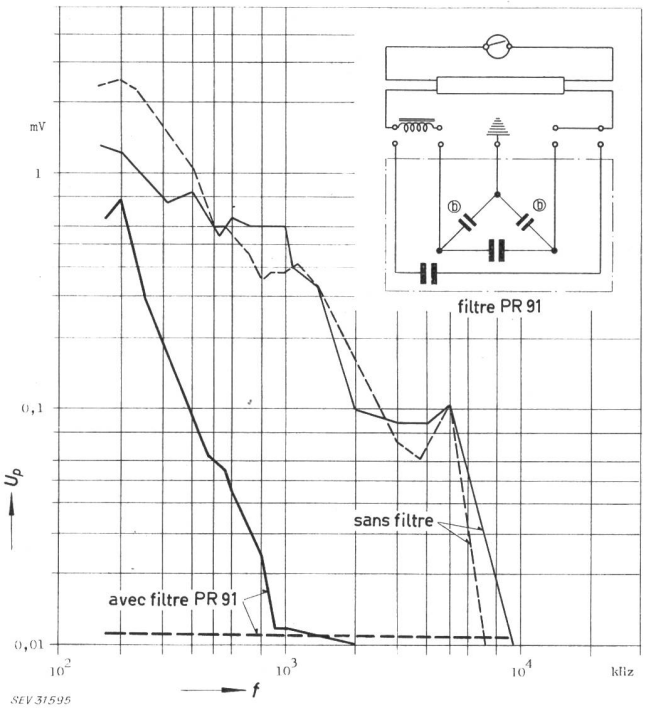


Fig. 12
Valeurs des tensions parturbatrices U_p d'une lampe de 20 W
——— mesure en asymétrique – – – – mesure en symétrique
f fréquence

Bibliographie

[1] *Coquillon, J.:* Condensateurs au papier imprégné. Electricité 40(1956)229, p. 171...174.
[2] *Church, H. F.:* Detection of Organic Impurities in Insulation. Techn. Rep. L/T 375. Leatherhead: The British Electrical and Allied Industries Research Association (ERA) 1958.
[3] *Sakamoto, T.* et *Y. Yoshida:* Examen des propriétés diélectriques du papier imprégné considéré comme diélectrique composé. J. IEE Japan 75(1955), Mai, p. 504...514. (en langue japonaise).
[4] *Monney, J.:* L'éclairage fluorescent et les perturbations radiophoniques. Revue suisse du Trafic et de l'Industrie 31(1959), août, p. 47...50.

Adresse de l'auteur:
Pierre Boyer, physicien diplômé, Condensateurs Fribourg S. A., Fribourg.

Entwicklung und gegenwärtiger Stand der Technik von hermetisch verschlossenen Relais

Von *P. v. Doderer* und *A. Bodamer*, München

621.318.5–213.3

Hohe klimatische, mechanische und elektrische Beanspruchungen führten zur Entwicklung des hermetisch verschlossenen Relais (Becherrelais). Um die Eigenschaften dieses Relais zu kennzeichnen, werden die Forderungen aufgezählt und die daraus abgeleiteten Prüfungen beschrieben.

Die Ausführungsarten von gebecherten Relais, die diese Prüfungen bestehen, werden dargestellt; abschliessend wird die zu erwartende Entwicklung auf diesem Gebiet erwähnt.

Bei der Entwicklung der beschriebenen Relais traten erhebliche z. T. unerwartete Schwierigkeiten auf. Lösungen, die zur Überwindung dieser Schwierigkeiten führten und die dabei gesammelten Erfahrungen werden beschrieben.

Des sollicitations climatiques, mécaniques et électriques élevées ont conduit à la mise au point d'un relais hermétiquement fermé. Pour en caractériser les propriétés, les auteurs indiquent les exigences auxquelles ce relais doit satisfaire et les essais qui sont nécessaires.

Ils décrivent les exécutions de relais hermétiques qui satisfont à ces essais, puis les perfectionnements auxquels on peut s'attendre dans ce domaine.

La mise au point de ce relais s'est heurtée à de grandes difficultés, parfois imprévues. Les auteurs indiquent comment elles furent surmontées et l'expérience qu'elles ont permis d'acquérir.

In den vergangenen Jahren sind die Ansprüche, die an elektrische Geräte und Bauelemente gestellt werden, erheblich gestiegen. Die elektromagnetischen Relais sind von dieser Entwicklung besonders betroffen. Man fordert von ihnen die sichere Funktion unter Umgebungsbedingungen, die früher für Relais undenkbar