

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses

**Band:** 75 (1984)

**Heft:** 21

**Artikel:** Un réflectomètre hyperfréquences à hexaporte

**Autor:** Zürcher, J.-F. / Gardiol, F.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-904497>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 19.11.2024

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

# Un réflectomètre hyperfréquences à hexaporte

J.-F. Zürcher et F. Gardiol

Le réflectomètre à hexaporte présente à première vue un grand intérêt pratique. Il est donc surprenant de constater que, sept ans après sa présentation dans des congrès techniques, cet appareil ne figure pas encore dans le catalogue des principaux fabricants d'instruments de mesure. Un réflectomètre à hexaporte – pour bande de fréquences étroite – a été développé à l'EPFL, menant à la réalisation d'un appareil portable d'usage simple pour la mesure des réflexions. Dans le cadre de ce projet, on a pu constater que le traitement de l'information (software) devient fort complexe, contrastant avec la partie circuits hyperfréquences, qui ne comporte qu'un combineur passif et des détecteurs. Fort probablement, les difficultés d'étalonnage ont jusqu'ici retardé la réalisation commerciale de ces appareils.

Auf den ersten Blick scheint das 6-Tor-Reflektometer von grossem praktischem Interesse zu sein. Es ist deshalb erstaunlich, dass dieses Gerät sieben Jahre nach der Vorführung an technischen Kongressen noch nicht im Verkaufsprogramm der wichtigsten Hersteller von Messgeräten aufgeführt ist. Ein schmalbandiges 6-Tor-Reflektometer, welches an der ETHL entwickelt wurde, hat zur einem tragbaren, benutzerfreundlichen Gerät geführt. Im Rahmen dieses Projektes wurde festgestellt, dass die Informationsverarbeitung (Software) sehr kompliziert wird, im Gegensatz zum Mikrowellenteil, der nur aus einer passiven Schaltung und aus Detektoren besteht. Sehr wahrscheinlich ist die marktgerechte Entwicklung dieser Geräte durch die Eichungsschwierigkeiten verzögert worden.

Conférence présentée le 15 mai 1984 au «Spring Meeting, IEEE Swiss Section Chapter on Electromagnetics and Microwaves».

## Adresse des auteurs

J.-F. Zürcher, premier assistant, et F. Gardiol, professeur, Laboratoire d'Electromagnétisme et d'Acoustique, EPFL, Chemin de Bellerive 16, 1007 Lausanne.

## 1. Introduction

En hyperfréquences, la réflexion a traditionnellement été mesurée sur une ligne fendue (fig. 1). Une sonde de mesure échantillonne le champ le long de la ligne ou du guide d'ondes [1]. A partir des amplitudes et des positions des maxima et des minima, on détermine la valeur du facteur de réflexion  $\rho$  – en amplitude et en phase – dans un plan de référence spécifié au préalable. Plusieurs manipulations sont requises, qui rendent les mesures délicates: seules

des personnes relativement qualifiées peuvent les mener à bien. Cette méthode n'est guère susceptible d'être automatisée.

Et si, au lieu d'une sonde mobile, on faisait usage de deux sondes fixes? On réalise ainsi un réflectomètre, qui peut comporter des sondes simples [2] ou des coupleurs directifs [3]. Dans les deux cas, on obtient deux signaux qu'il s'agit de comparer, en amplitude et en phase. Pour ce faire, les signaux sont mélangés, échantillonnés, décalés en fréquence, etc., dans des appareils très sophistiqués appelés analyseurs de réseau (network analyzer) [4]. On peut directement lire sur ces instruments l'amplitude et la phase du facteur de réflexion.

On peut aussi l'afficher en diagramme polaire sur un abaque de Smith [5]. Cet équipement est cependant fort coûteux et encombrant, destiné typiquement à des laboratoires d'un certain standing. De toute façon, les coupleurs utilisés pour prélever le signal ne sont pas parfaitement directifs [6], introduisant ainsi des incertitudes de mesure (trop souvent ignorées des utilisateurs).

Ajoutant encore deux sondes, on obtient une jonction à six accès, ou hexaporte. On peut dans ce cas laisser tomber les mesures de phase et se contenter de quatre mesures d'amplitude (puissance). En partant de ces quatre valeurs, on peut – au moins en principe – déterminer le facteur de réflexion  $\rho$  en amplitude et en phase. Préconisé par Engen et Hoer [7; 8], le principe de l'hexaporte a été présenté en 1977 et a rencontré un vif intérêt dans les milieux des hyperfréquences. De nombreuses publications lui ont été consacrées, ainsi que des présentations à des congrès, voire même des séances complètes. Et pourtant, sept ans après les premières annonces, aucun appareil de mesure à hexaporte n'est encore disponible sur le marché...

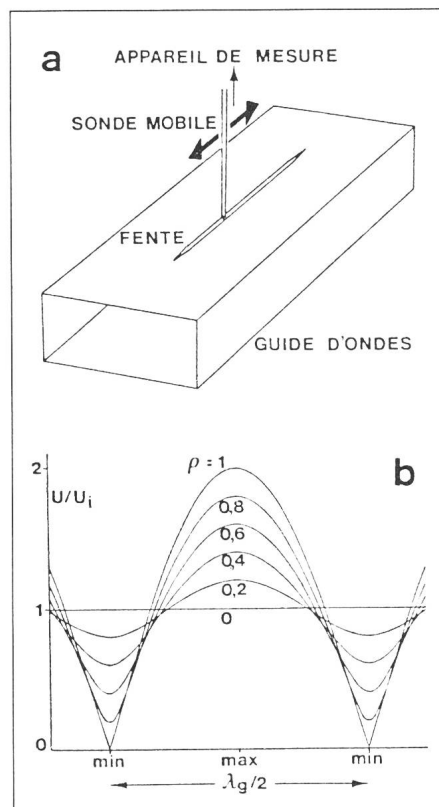


Fig. 1 Ligne fendue en guide d'ondes

a disposition

b tension  $U$  sur la ligne fendue rapportée à la tension  $U_i$  de l'onde incidente, pour différentes valeurs du facteur de réflexion  $\rho$ .  $\lambda_g$  est la longueur d'onde dans le guide ou ligne de transmission considérée.

Si vraiment le principe est si intéressant, comment se fait-il qu'il n'ait pas encore fait son apparition dans les applications courantes?

Telle est la question que cet article va considérer, en se basant sur un projet réalisé au Laboratoire d'Electromagnétisme et d'Acoustique (LEMA) de l'EPFL.

## 2. Spécifications

Pour effectuer des mesures non destructives de matériaux [9], on souhaite disposer d'un mesureur de réflexions qui satisfasse aux critères suivants:

- portatif (pour usage hors du laboratoire),
- d'un usage aisé (même pour du personnel non qualifié),
- mesure en «temps réel» (pas besoin de calculs ultérieurs pour obtenir  $\underline{\rho}$ ),
- bonne précision.

Ni la ligne fendue, ni les analyseurs de réseau ne remplissent toutes ces conditions. En revanche, un hexaporte couplé à un microprocesseur est susceptible de donner satisfaction. Dans une première phase, on prévoit d'effectuer les mesures à une seule fréquence; le dispositif devrait cependant être utilisable ultérieurement sur une certaine plage de fréquences.

## 3. Principe de base: hexaportes idéaux

La mesure par hexaportes est basée en fait sur une idée déjà ancienne: c'est en 1943 que Samuel proposait l'emploi de quatre sondes fixes disposées à un huitième de longueur d'onde les unes des autres [10] (fig. 2). Si  $\underline{a}$  et  $\underline{b}$  sont respectivement les amplitudes généralisées des ondes incidente et réfléchie dans le plan de la dernière sonde (ou à  $n$  demi-longueurs d'ondes de celle-ci), les puissances détectées par les quatre sondes sont proportionnelles à

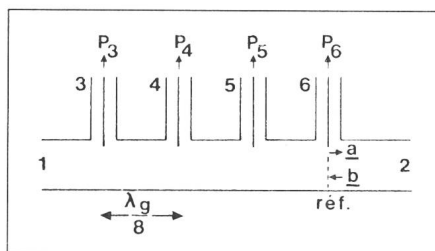


Fig. 2 Hexaporte à quatre sondes

Le générateur est connecté à l'accès 1, la réflexion que l'on veut mesurer à l'accès 2. Le plan de référence est fixé au niveau de la sonde la plus proche de la sortie (accès 6).

$$P_3 \sim |\underline{a} + j\underline{b}|^2 = |\underline{a}|^2 + |\underline{b}|^2 - 2|\underline{a}||\underline{b}|\sin\varphi \quad (1)$$

$$P_4 \sim |\underline{a} - \underline{b}|^2 = |\underline{a}|^2 + |\underline{b}|^2 - 2|\underline{a}||\underline{b}|\cos\varphi \quad (2)$$

$$P_5 \sim |\underline{a} - j\underline{b}|^2 = |\underline{a}|^2 + |\underline{b}|^2 + 2|\underline{a}||\underline{b}|\sin\varphi \quad (3)$$

$$P_6 \sim |\underline{a} + \underline{b}|^2 = |\underline{a}|^2 + |\underline{b}|^2 + 2|\underline{a}||\underline{b}|\cos\varphi \quad (4)$$

Le facteur de réflexion est défini par

$$\underline{\rho} = \underline{b}/\underline{a} = |\underline{b}/\underline{a}| \exp(j\varphi) \quad (5)$$

On constate alors que  $(P_6 - P_4)$  est proportionnel à la partie réelle de  $\underline{\rho}$  ( $P_5 - P_3$ ) à sa partie imaginaire. Il suffit donc de connecter les sorties des détecteurs à des amplificateurs différentiels, et les sorties de ceux-ci aux entrées H et V d'un oscilloscope. L'écran représente alors le diagramme complexe de  $\underline{\rho}$ , autrement dit l'abaque de Smith [5]. On pourrait en principe se contenter de trois sondes, le traitement de l'information devenant plus compliqué dans ce cas.

Cette situation est bien entendu idéale: on a supposé que les quatre sondes sont identiques, que leur couplage au guide d'ondes est négligeable - bien que le signal prélevé soit d'amplitude suffisante pour les mesures. Les détecteurs sont supposés identiques et adaptés. Finalement, lorsque toutes ces conditions sont satisfaites, la méthode reste d'un usage limité pour des raisons géométriques: la distance entre les sondes est fixe, elle ne sera donc égale à  $\lambda_g/8$  qu'à une seule fréquence. On a constaté expérimentalement que ce dispositif donne une précision de 5% sur une bande de fréquences de 5%. Comme ce n'est guère intéressant en pratique, il n'a pratiquement pas été utilisé.

Les hexaportes proposés plus récemment sont formés en combinant des jonctions et des coupleurs. Une jonction en ligne microruban, comportant cinq coupleurs hybrides a été réalisée au LEMA (fig. 3) à l'aide d'un programme de découpe de masques MICROS [11]. La fréquence centrale des coupleurs a été fixée à 2,45 GHz, dans la bande ISM (Industrielle, Scientifique et Médicale), où l'on a souvent besoin de connaître les propriétés des matériaux. En supposant des coupleurs et des détecteurs idéaux, on trouve

$$\underline{\rho} = \frac{\exp(j\theta)}{4\sqrt{2}P_4} [2(P_5 - P_6) + j(P_3 + P_4 - P_5 - P_6)] \quad (6)$$

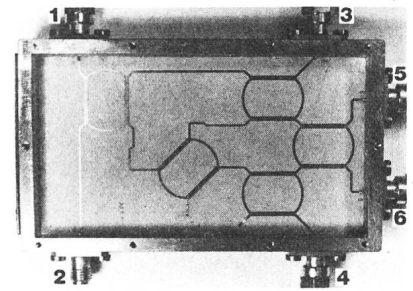


Fig. 3 Hexaporte en ligne microruban réalisé au LEMA

Le générateur est connecté à l'accès 1, l'élément dont on veut mesurer la réflexion à l'accès 2. Les accès 3 à 6 sont terminés par des détecteurs qui mesurent respectivement les puissances  $P_3$  à  $P_6$ .

où l'angle de phase  $\theta$  dépend du plan de référence choisi (à déterminer par étalonnage).

Il est facile de déterminer si cette situation idéale est réalisée en pratique: il suffit de déplacer un piston de court-circuit mobile, connecté à l'accès de mesures. 2. Le facteur de réflexion  $\underline{\rho}$  doit alors décrire un cercle dans le plan complexe. On a obtenu une ellipse, ce qui signifie que la situation n'est pas idéale: les divers éléments sont désadaptés, les coupleurs ont une directivité limitée et partagent inégalement le signal, les déphasages produits par les sections de lignes ne sont pas exactement ceux prévus. Deux méthodes permettent de faire face à cette situation:

- On peut ajuster, accorder, adapter chacun des éléments jusqu'à ce que l'ensemble forme un hexaporte idéal. Les calculs sont dans ce cas fort simples (6), mais la procédure d'adaptation devient en revanche très délicate. Pratiquement, chaque composant doit d'abord être adapté séparément, avant l'assemblage. De plus, une adaptation adéquate n'est réalisable que sur une bande étroite de fréquences.
- On peut faire usage d'un hexaporte imparfait, et faire appel au calcul (ordinateur, microprocesseur) pour tenir compte des imperfections. Dans ce cas, aucun ajustage n'est requis, mais la difficulté est reportée sur le traitement informatique.

Le premier procédé intervient sur le plan du matériel (hardware), il n'est guère possible hors des laboratoires de métrologie; il faut de plus disposer d'un montage de mesures pour chaque fréquence. Le deuxième procédé traite le logiciel (software). Il est compatible avec le caractère portatif de l'instrument souhaité; les mesures pourront

être faites sur une bande de fréquences plus large. C'est ce deuxième procédé qui a été choisi pour la présente étude.

#### 4. Traitement théorique d'un hexaporte linéaire non idéal

On suppose que l'hexaporte utilisé est linéaire (décrit par sa matrice de répartition), que les détecteurs connectés aux accès 3 à 6 ont une réponse quadratique, mais que leur réflexion est linéaire. Dans le schéma de la figure 3, la puissance  $P_4$  est à peu près proportionnelle à celle du signal fourni par le générateur: cela signifie qu'en fonctionnement  $P_4$  ne s'annule jamais. On peut de ce fait l'utiliser comme base de normalisation et définir trois puissances réduites

$$2P_i = P_i/P_4 \quad i = 3,5,6... \quad (7)$$

L'étude détaillée du système donne trois équations [12]

$$|W|^2 = p_3 \quad (8)$$

$$|W - W_1|^2 = \zeta p_5 \quad (9)$$

$$|W - W_2|^2 = \eta p_6 \quad (10)$$

où  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $\zeta$  et  $\eta$  sont des constantes caractéristiques du système, à déterminer par étalonnage, et  $W$  est une grandeur complexe liée au facteur de réflexion  $\underline{\rho}$  par une transformation conforme:

$$\underline{\rho} = \frac{W - \beta}{\alpha - \gamma W} \quad (11)$$

Les constantes complexes  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont aussi des valeurs caractéristiques du système, qui doivent également être déterminées par étalonnage.

#### 5. Mesures

Supposant que toutes les constantes ont été déterminées (étalonnage, section 6), on procède comme suit:

- on mesure les puissances  $P_3$ ,  $P_4$ ,  $P_5$  et  $P_6$ ;
- on normalise par rapport à  $P_4$ , ce qui donne  $p_3$ ,  $p_5$  et  $p_6$ ;
- on détermine  $W$  avec les trois équations (8...10). Elles représentent trois cercles dans le plan complexe, qui se coupent en un point  $W$ . En pratique cependant, suite à de légères erreurs de mesure, à l'effet du

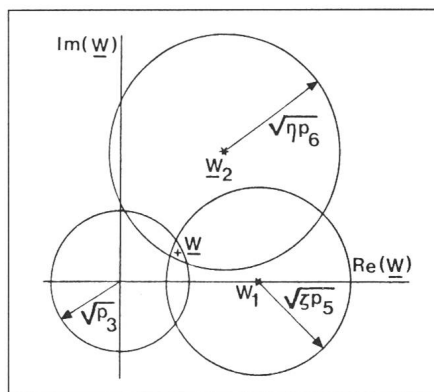


Fig. 4 Représentation graphique dans le plan  $W$  des équations 8, 9 et 10 qui définissent des cercles

Les centres des ces cercles sont situés en  $O$ ,  $W_1$  et  $W_2$ . Les rayons sont donnés respectivement par  $\sqrt{p_3}$ ,  $\sqrt{\zeta p_5}$  et  $\sqrt{\eta p_6}$ , où les  $p_i$  sont les puissances relatives à l'accès 4. Les deux constantes  $\eta$  et  $\zeta$  sont déterminées par étalonnage, de même que les centres des cercles.

bruit et aux non-linéarités des détecteurs, les trois cercles ne se coupent pas exactement en un point. Il faut donc déterminer la position la plus probable pour  $W$  (fig. 4). On a choisi, arbitrairement, de prendre le point qui minimise la somme des carrés des distances aux trois cercles;

- une fois  $W$  connu, on obtient  $\underline{\rho}$  à l'aide de (11).

#### 6. Etalonnage de l'appareil

L'étalonnage procède en deux étapes. Pour une terminaison quelconque connectée à l'accès 2, les trois puissances réduites se situent sur un paraboléide ellipsoïdal dans l'espace des  $p_3$ ,  $p_5$  et  $p_6$ :

$$Ap_3^2 + Bp_5^2 + Cp_6^2 + Dp_3p_5 + Ep_3p_6 + Fp_5p_6 + Gp_3 + Hp_5 + Jp_6 = -1 \quad (12)$$

On mesure donc les triades ( $p_3$ ,  $p_5$ ,  $p_6$ ) qui correspondent à un grand nombre de terminaisons de valeurs arbitraires et on détermine les 9 coefficients  $A$  à  $J$  par la méthode des moindres carrés. Les constantes  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $\zeta$  et  $\eta$ , qui définissent les cercles, sont des fonctions des coefficients  $A$  à  $J$  [12]. Cette méthode ne requiert pas de terminaisons étalonnées à ce stade, contrairement à d'autres techniques proposées ailleurs.

Dans la deuxième phase de l'étalonnage on connecte successivement trois terminaisons calibrées, ayant des fac-

teurs de réflexion  $\underline{\rho}$  connus, à l'accès 2 de l'hexaporte. On détermine alors les valeurs correspondantes de  $W$  (section 5). Les valeurs des trois constantes complexes  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont alors obtenues en utilisant (11). En pratique, on fait usage de trois court-circuits fixes décalés de  $\lambda_g/6$ .

#### 7. Réalisation de l'instrument

Le traitement des valeurs mesurées, décrit à la section 5, est effectué par un microprocesseur. Comme les calculs comportent plusieurs opérations mathématiques (racine, puissance, arctan, etc.) le choix s'est porté sur un circuit MM57109, qui permet de réaliser directement ces opérations (c'est en fait l'unité centrale d'une calculatrice). Les instructions, ainsi que les constantes (étalonnage) sont mémorisées sur une EPROM. Une RAM sert à enregistrer les résultats intermédiaires. Les instructions en code binaire sont fournies par un programme de traduction implanté sur l'ordinateur VAX VMS du Département d'Electricité. Le temps nécessaire aux calculs pour une valeur de  $\underline{\rho}$  est de l'ordre de 40 s; il pourrait en principe être réduit en faisant usage d'une unité centrale plus rapide - mais qui serait certainement plus difficile à programmer.

Les opérations d'étalonnage dépassent en revanche les capacités du microprocesseur. Elles sont effectuées sur un système d'acquisition de données piloté par une calculatrice de table HP9835. Les constantes  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $\zeta$ ,  $\eta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  sont déterminées, puis inscrites dans l'EPROM du microprocesseur. Les détails de programmation sont décrits en [12].

L'appareil de mesure a été complété par un générateur à transistor à 2,45 GHz. On a ainsi réalisé un instrument portatif pour la mesure de réflexions (fig. 5). Les valeurs de  $\underline{\rho}$  mesurées avec



Fig. 5 Le réflectomètre à hexaporte complet, y compris la source de signal à 2450 MHz (MESFET) et l'alimentation par batteries

Terminaison	Hexaporte		Ligne fendue	
	module	phase	module	phase
Court-circuit	0,981	-179,9°	0,982	-180,0°
Affaiblisseur 3 dB et court-circuit	0,475	99,6°	0,467	101,0°
Affaiblisseur 10 dB et court-circuit	0,099	106,1°	0,090	106,3°
Section de ligne et court-circuit	0,975	-57,0°	0,975	-56,1°

plusieurs terminaisons sont très proches de celles obtenues à la ligne fendue (tab. I).

### 8. Conclusion

Un réflectomètre portatif, d'un usage facile, raisonnablement précis et assez rapide pour beaucoup d'applications pratiques (quoique pas tout à fait en temps réel) a été réalisé en utilisant un hexaporte et un microprocesseur. Son usage est limité à une étroite bande de fréquences autour de la fréquence d'étalonnage.

Un réflectomètre comparable aux analyseurs de réseaux disponibles dans le commerce devrait être étalonné sur une grande bande de fréquences: chacun des paramètres  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $\zeta$ ,  $\eta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  est alors une fonction de la fréquence. Des fonctions adéquates pour l'interpolation doivent alors être déterminées empiriquement. Par ailleurs, la fréquence du signal

doit être connue pour pouvoir effectuer les mesures: le réflectomètre à hexaporte doit obligatoirement être couplé à un compteur de fréquences. L'hexaporte lui-même (fig. 3) est formé de coupleurs hybrides, dont la bande de fréquences est limitée; si l'on veut effectuer des mesures sur une bande de fréquences plus large, il faudra les remplacer par des coupleurs idoines. Cependant, les contraintes à satisfaire ne sont pas trop sévères (si l'on n'a pas la prétention de réaliser un hexaporte idéal à large bande...). Il faut que les centres des trois cercles ne soient pas trop rapprochés les uns des autres, pour que les intersections soient bien définies.

L'étalonnage d'un tel appareil sur une grande bande de fréquences nécessiterait un grand nombre d'opérations; il serait complexe et délicat. Il devrait être effectué pour chaque hexaporte, et il faudrait certainement le répéter chaque fois qu'on change un détec-

teur, sans parler des vérifications périodiques. Il s'agit d'une tâche pratiquement prohibitive. On comprend donc pour quelles raisons le réflectomètre à hexaporte ne se trouve pas encore sur toutes les tables de laboratoire.

### Bibliographie

- [1] *A.B. Giordano*: Measurement of standing wave ratio. In: Handbook of microwave measurements. Edited by M. Sucher and J. Fox. Third edition. New York/London, Polytechnic Press of the Polytechnic Institute of Brooklyn, 1963; vol I, p. 73...133.
- [2] *F.C. de Ronde*: A precise and sensitive X-band reflectometer providing automatic full-band display of reflection coefficient. IEEE Trans. MTT 13(1965)4, p. 435...440.
- [3] *G.F. Engen and R.W. Beatty*: Microwave reflectometer techniques IRE Trans. MTT 7(1959)3, p. 351...355.
- [4] *R.W. Anderson and O.T. Dennison*: An advanced new network analyzer for sweep measuring amplitude and phase from 0.1 to 12.4 GHz. Hewlett-Packard Journal 18(1967)2, p. 2...9.
- [5] *F. Gardiol*: Electromagnétisme. Traité d'électricité de l'EPFL, vol. III. St-Saphorin, Editions Georgi, 1977.
- [6] *C. Staeger and P. Kartaschoff*: Swept-frequency measurements: Measurements accuracy hinges on coupler design. Microwaves 16(1974)4, p. 41...46.
- [7] *C.A. Hoer*: Theory and applications of a six-port coupler. NBS-Report 10757. Boulder/Colorado, National Bureau of Standards, 1972.
- [8] *G.F. Engen*: An improved circuit for implementing the six-port technique of microwave measurement. IEEE Trans. MTT 25(1977)12, p. 1080...1083.
- [9] *F. Gardiol*: Open-ended waveguides, principles and applications. In: Advances in electronics and electron physics. New York, Academic Press, 1984; Supplement 1984.
- [10] *A.L. Samuel*: An oscilloscope method of presenting impedances on the reflection coefficient plane. Proc. IRE 35(1947)11, p. 1279...1283.
- [11] *J.F. Zürcher*: A simple and efficient program for automatizing the design and preparing the mask for microstrip circuits. Mikrowellen Magazin 7(1981)4, p. 407...409.
- [12] *J.F. Zürcher, M. Borgeaud and F. Gardiol*: A compact portable six-port reflectometer. Mikrowellen Magazin 9(1983)2, p. 168...175.