

NOUVEAUX GENERATEURS DE SIGNAUX ELECTRIQUES PROGRAMMABLES

I — CONSIDERATIONS SUR L'EVOLUTION DE L'INSTRUMENTATION NUMERIQUE DANS LE DOMAINE DES GENERATEURS

- 1) Les techniques numériques dans l'instrumentation.
- 2) Le décalage entre les appareils « passifs » (Mesureurs) et les appareils « actifs » (Générateurs-Simulateurs).
- 3) Développement parallèle des générateurs numériques et dualité des deux familles instrumentales.
- 4) L'automatisme et la recherche d'une plus grande efficacité.
- 5) L'optimisation des procédés de mesure, contrôle, réglage... (parallélisme avec le « process control » industriel).

II — CONCEPTION DES GENERATEURS MODERNES DE SIGNAUX ELECTRIQUES

- 1) Procédé numérique appliqué pour la génération de fréquences (procédé de synthèse).
- 2) Rappel des procédés classiques de génération d'une tension continue et solution numérique nouvelle utilisée.
- 3) Procédé numérique de génération d'un déphasage.
- 4) Les données fondamentales de la conception des instruments (précision, stabilité, programmabilité, fonctions multiples...).

III — EXEMPLES DE REALISATIONS INSTRUMENTALES - PERFORMANCES - APPLICATIONS

- 1) Divers générateurs de fréquence de 0,001 Hz à 60 MHz utilisant les procédés de synthèse — Performances.
- 2) Générateur étalon de tension 10 μ V à 100 V — Performances.
- 3) Générateur BF/TBF à fréquence et déphasage programmables.
- 4) Equipements périphériques de programmation et accessoires pour générateurs numériques — Applications.

I — CONSIDERATIONS SUR L'EVOLUTION DE L'INSTRUMENTATION NUMERIQUE DANS LE DOMAINE DES GENERATEURS

1) Les techniques numériques dans l'instrumentation.

On sait l'importance prise maintenant par les techniques numériques dans de nombreux domaines de l'instrumentation, qu'il s'agisse d'usage de laboratoires ou d'applications industrielles.

Liée étroitement à l'évolution des besoins des utilisateurs ainsi qu'aux moyens offerts par la technologie électronique, cette pénétration du « numérique » trouve de nombreuses justifications, bien connues, objet de non moins nombreuses publications.

Nous n'en citons donc, pour mémoire, que les plus significatives :

- Commodités d'affichage, de lecture, d'enregistrement, de manipulation,
- Précision,
- Compatibilité avec les moyens de traitement d'information, etc.

2) Le décalage entre les appareils « actifs » et les appareils « passifs » :

Mais il est intéressant de constater que cette pénétration ne s'est pas effectuée de façon uniforme dans l'ensemble de l'instrumentation électronique.

Considérons, en effet, les deux grandes familles d'instruments que sont, d'une part, les MESUREURS et, d'autre part, les GENERATEURS. (Nous entendons par Mesureurs les instruments du type « passif » dont l'objet est de fournir une ou plusieurs informations sur une grandeur électrique, tels que les voltmètres, ampèremètres, ohmmètres, fréquencemètres, chronomètres, phasemètres, etc. Ces appareils réalisent une « mensuration ».

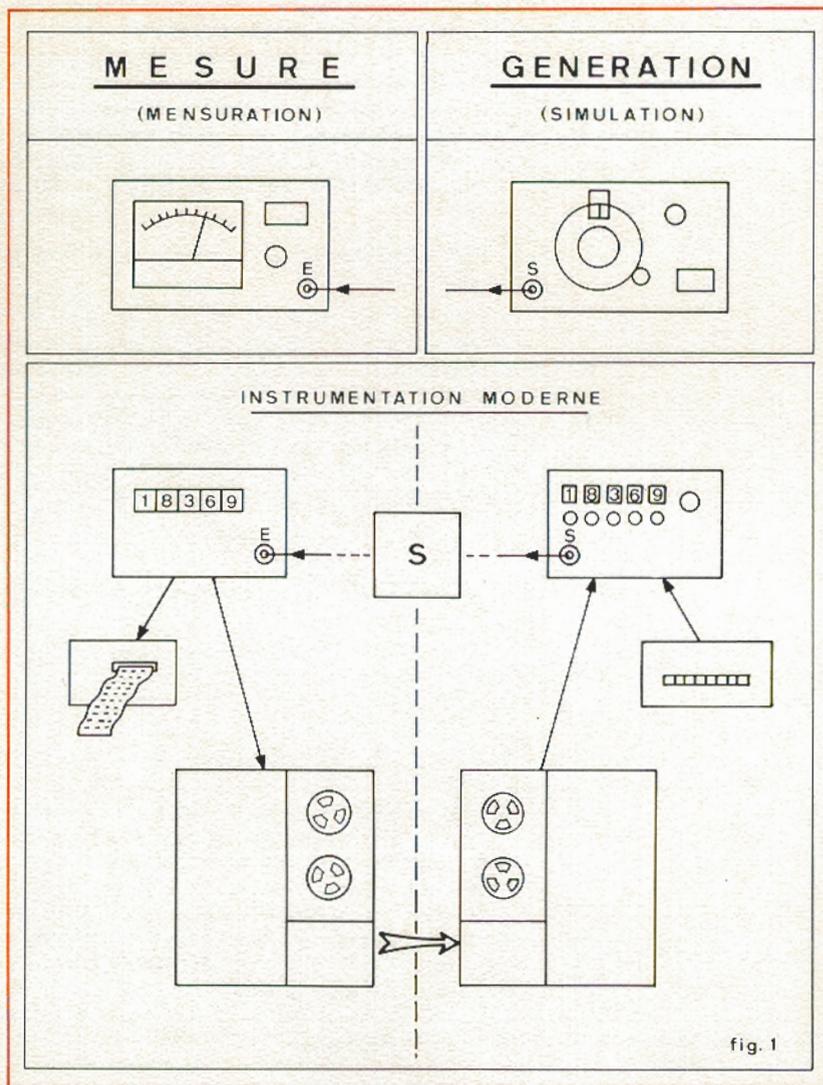
Par ailleurs, les générateurs, instruments de type « actif », sont destinés à délivrer un ou plusieurs signaux artificiels. Ces appareils réalisent une « simulation ».)

Ces deux familles ne constituent pas, bien entendu, la totalité de l'instrumentation mais en représentent, ensemble, la part fondamentale par l'universalité de leur emploi.

Il est alors aisé de constater que les procédés numériques se sont introduits beaucoup plus rapidement et beaucoup plus profondément dans le domaine des mesureurs que dans celui des générateurs et ce, bien que, historiquement, les principes et les moyens en aient pratiquement été connus aux mêmes époques.

Cet état de fait tient initialement à diverses causes telles que :

- Le niveau insuffisant de performances des mesureurs par rapport à celui des générateurs,
- Le développement important des procédés numériques, applicables aux mesureurs, dans d'autres domaines (circuits logiques, ordinateurs),
- La relative complexité des solutions numériques applicables aux générateurs, entraînant des considérations économiques,
- La nature souvent « analogique » des signaux fournis par les générateurs,
- La généralisation d'emploi des mesureurs dans tous les domaines d'application,
- L'intérêt croissant de l'enregistrement numérique des résultats, etc.



3) Développement parallèle des générateurs numériques et dualité des deux familles instrumentales.

Mais trois considérations fondamentales conduisent maintenant au développement des procédés numériques dans les techniques de génération, à savoir :

- Les progrès de la technologie (circuits intégrés),
- Les exigences croissantes en performances (**précision, stabilité**),
- Le développement de l'automatisation au niveau des procédés de mesure et de contrôle (**programmation**).

Cette nouvelle évolution permet alors d'aborder un aspect plus général et, dans un sens, plus philosophique des caractères propres aux deux familles essentielles de l'instrumentation moderne.

Nous avons essayé de concrétiser cet aspect sous la forme du tableau Figure I dans lequel sont représentés symboliquement :

à gauche : le domaine des mesureurs,

à droite : le domaine des générateurs,

à la partie supérieure : l'instrumentation classique schématisée par des instruments comportant, côté mesureur, une aiguille se déplaçant devant un cadran gradué et, côté générateur, un cadran gradué se déplaçant derrière un index,

au milieu : l'instrumentation moderne schématisée, côté mesureur, par un instrument comportant un affichage numérique et disposant de sorties d'informations codées et, côté générateur, par un instrument comportant une commande et un affichage numériques et disposant d'entrées d'informations codées,

à la partie inférieure : les auxiliaires (facultatifs) de cette instrumentation schématisés, côté mesureur, par des équipements d'enregistrement ou de traitement de l'information et, côté générateur, par des équipements de programmation soit manuelle (télécommande), soit automatique (programmeurs complexes, ordinateurs...).

Ce tableau fait alors clairement apparaître la dualité des procédés de mesure et de génération tels qu'ils apparaissent au niveau des besoins les plus évolués.

4) L'automatisme et la recherche d'une plus grande efficacité.

Il permet déjà, pour chacune des familles d'instruments considérées, de saisir l'aspect essentiel de l'évolution, caractérisé par la faculté des instruments de pouvoir être raccordés à des équipements auxiliaires intervenant soit « en deçà », soit « au-delà » des fonctions instrumentales proprement dites, dans un but unique de plus grande efficacité. Les utilisateurs peuvent alors exploiter, selon la nature de leurs problèmes, tout un éventail de techniques instrumentales allant de l'utilisation manuelle la plus courante à l'automatisme intégral et à l'optimisation.

5) L'optimisation des procédés de mesure, contrôle, réglage...

A partir du moment où il est possible, au stade le plus évolué de la conception d'une chaîne instrumentale, de faire intervenir un ordinateur, on peut envisager le « bouclage » de la chaîne et ainsi réaliser une rétroaction de la mesure sur la simulation en vue d'obtenir un résultat « optimal » au niveau du système ou du dispositif soumis aux essais (S sur le tableau).

On retrouve ici le schéma de principe classique de la régulation automatique des processus industriels (« process control ») mais ce qu'il nous semble important de souligner c'est, maintenant, la possibilité d'extension des mêmes procédés d'optimisation à bien d'autres domaines de l'activité scientifique et industrielle, qu'il s'agisse de la Recherche pure et des travaux de laboratoires, où l'empirisme et la recherche du meilleur résultat sont des données permanentes, ou qu'il s'agisse de l'automatisation des procédés et moyens de contrôle et de réglage, généralement moins développée que celle des procédés et moyens de production.

II — CONCEPTION DES GENERATEURS MODERNES DE SIGNAUX ELECTRIQUES

Notre propos n'est pas ici d'entrer dans le détail de la réalisation technique au niveau des circuits — dont les structures peuvent d'ailleurs être très diverses — mais d'insister plus particulièrement, en nous appuyant sur des exemples concrets de réalisation, sur la mise en application de nouveaux concepts instrumentaux découlant de l'analyse précédente.

Toutefois, nous croyons utile de rappeler brièvement les principes de base sur lesquels reposent les procédés de génération (fréquence et tension) à structure numérique en précisant ceux qui ont été retenus pour les matériels présentés.

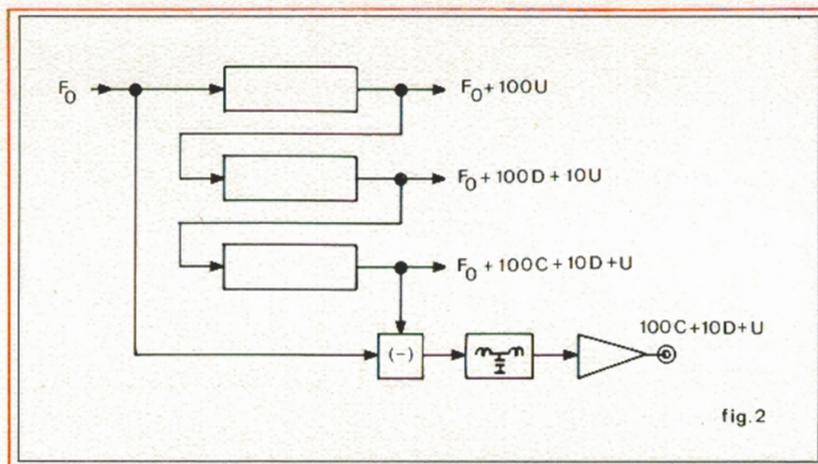
1) Procédé numérique employé pour la génération de fréquences (procédé de synthèse).

Bien que les mêmes procédés soient applicables à d'autres types, (générateurs d'impulsions, par exemple) nous n'évoquerons ici que le cas des générateurs de signaux sinusoïdaux qui, de la très basse fréquence (T.B.F.) aux hyper-fréquences (U.H.F.) embrassent un très vaste domaine d'applications.

Le principe utilisé est celui dit de « synthèse » par lequel le signal délivré est engendré à partir d'un maître oscillateur unique (F_0) et de certains de ses différents harmoniques.

Partant de ce principe, plusieurs procédés peuvent être envisagés pour obtenir un même résultat, à savoir :

sélectionner individuellement les différents chiffres du nombre mesurant la fréquence désirée, le signal délivré étant toujours, quelle que soit sa valeur, asservi au maître oscillateur.



Parmi ces procédés, nous avons retenu celui dit de « synthèse itérative » schématisé sur la figure 2 dans le cas simple d'une fréquence comportant 3 chiffres significatifs.

Soient C (Centaines), D (Dizaines) et U (Unités), les 3 chiffres du nombre désiré. Si l'unité retenue est le hertz (Hz), la fréquence délivrée devra avoir pour valeur : $(100 C + 10 D + U)$ Hz.

Le procédé consiste, partant d'une fréquence auxiliaire F_0 , à engendrer successivement les fréquences $(F_0 + 100 U)$, $(F_0 + 100 D + 10 U)$, $(F_0 + 100 C + 10 D + U)$.

Un mélangeur soustracteur final, recevant également la fréquence F_0 , délivre la fréquence de sortie $100 C + 10 D + U$.

Ainsi qu'on le voit, chaque unité insérant un nouvel incrément de fréquence (ou « décade de fréquence ») doit diviser par 10 la somme des « incréments » précédents et ajouter son propre incrément.

La figure 3 schématise la structure possible d'une telle décade de fréquence.

Si A est la somme des incréments précédents, la fréquence incidente $F_0 + A$ est divisée par 10 et appliquée au « mélangeur-sommeur » de sortie, ainsi que la fréquence $\frac{9F_0}{10} + B$ issue de l'oscillateur O.

La fréquence de sortie est égale à $F_0 + \frac{A}{10} + B$, ainsi qu'il est recherché.

La génération de la fréquence $\frac{9F_0}{10} + B$ est obtenue à l'aide du comp-

teur à capacité variable C, dont la fréquence de recyclage est comparée à la fréquence de référence F_r à l'aide du discriminateur de phase D. Celui-ci commande, à travers l'amplificateur I, la fréquence de l'oscillateur O.

Pratiquement, le compteur à capacité variable C constitue l'élément proprement numérique du système.

Son rôle est donc fondamental car c'est en agissant sur sa prédétermination, à l'aide de signaux codés, par exemple, que peut être réalisée la **programmation** manuelle ou automatique de chaque décade du générateur-synthétiseur.

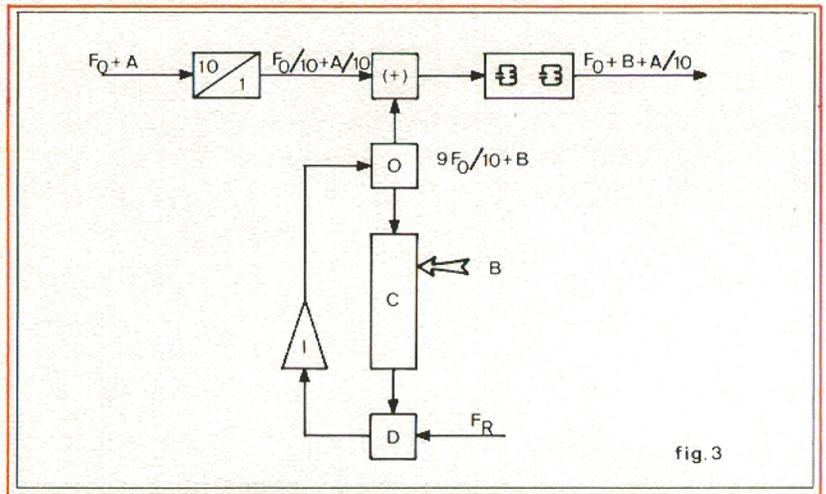


fig. 3

2) Génération de tension continue étalon :

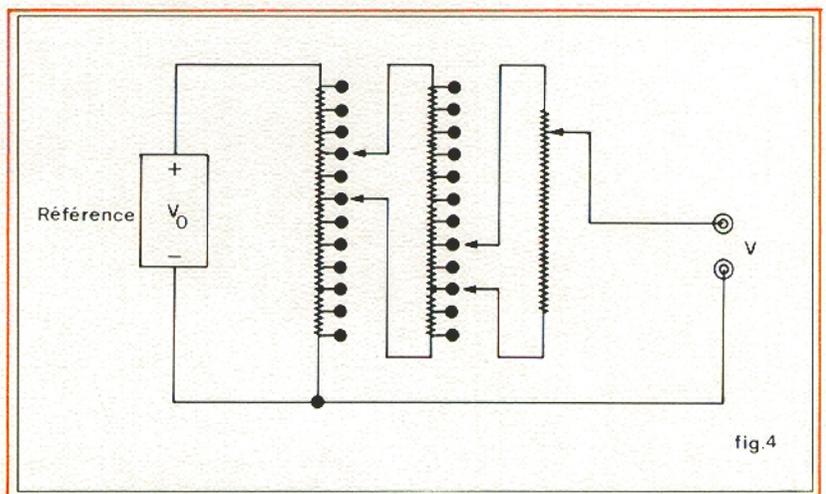


fig. 4

La technique traditionnelle utilisée pour la génération d'une tension continue précise et réglable est représentée figure 4.

Elle consiste, partant d'un étalon secondaire utilisant comme référence une pile étalon, une diode Zener, ou tout autre élément à tension stable et définie, à engendrer les différentes valeurs discrètes de la tension d'utilisation à l'aide d'un diviseur potentiométrique de précision, par exemple du type Kelvin-Varley.

L'impédance de sortie d'un tel diviseur n'étant pas constante en fonction de la valeur affichée, et relativement élevée, un amplificateur abaisseur d'impédance de sortie est nécessaire pour compléter l'appareil en tant que source de tension étalon.

Un tel dispositif met en jeu, par principe même, un nombre assez élevé d'admittances étalonnées (ou minimum 4 par décade dans un système numérique décimal codé binaire) et la mise en œuvre de la « programmation » entraîne la commutation de nombreux circuits posant de sérieux problèmes de contacts, qu'ils soient électromécaniques ou à état solide.

Le dispositif suivant, basé sur un tout autre principe, palie ces inconvénients.

Solution numérique.

Le procédé retenu, représenté figure 5 est basé sur l'emploi de « compteurs à prédétermination » et s'apparente au principe de la modulation par impulsions, le paramètre codé étant la largeur des impulsions, supposées à amplitude et à fréquence constantes.

Si la tension de référence V est connectée au filtre de sortie pendant un intervalle de temps T , à chaque période de récurrence T_1 d'un compteur prédéterminé, et si ce même filtre est mis à la masse pendant le reste du temps, la tension à l'entrée du filtre est une série de créneaux dont la décomposition en série de Fourier fait apparaître un terme continu égal à :

$$V = V_0 \times \frac{T}{T_1} = V_0 \times \frac{K}{N}$$

où N est la capacité du compteur et K la valeur prédéterminée.

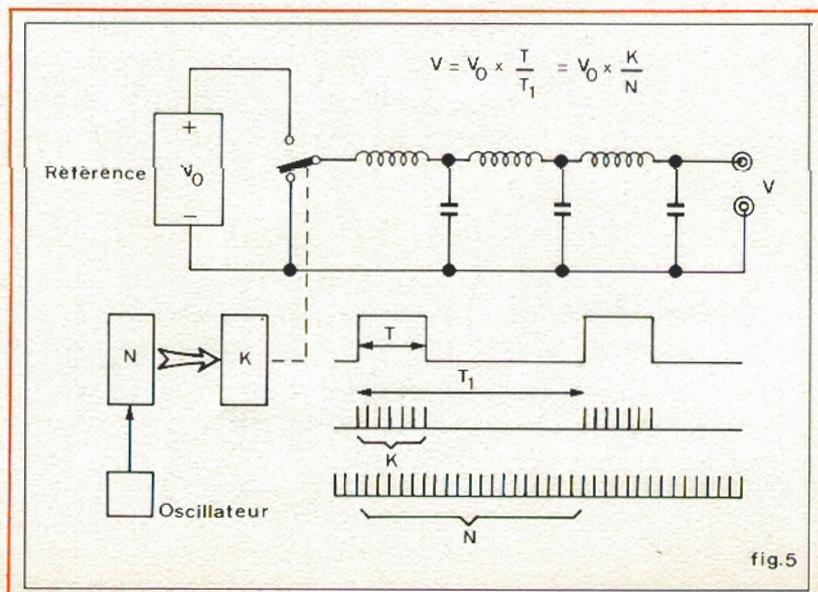
Les autres termes de la série de Fourier correspondent à des fréquences toutes multiples de $F = \frac{1}{T_1}$

Si l'on dimensionne les éléments du filtre pour éliminer avec le degré de précision recherché les fréquences égales ou supérieures à $\frac{1}{T_1}$, la tension de sortie est une tension continue **proportionnelle à la**

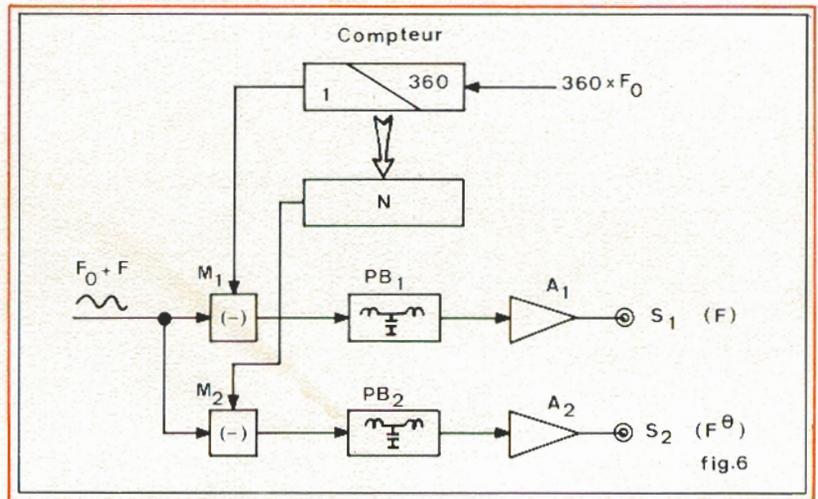
valeur de consigne du compteur prédéterminé.

On voit qu'un tel procédé ne nécessitera pratiquement qu'un minimum d'éléments précis (ceux nécessaires à l'élaboration des impulsions normalisées — soit 3 éléments au total) et qu'il exploite un dispositif de comptage prédéterminé à structure essentiellement numérique.

Il offre de plus, par son principe même, l'avantage de présenter une parfaite linéarité intrinsèque.



3) Procédé numérique de génération d'un déphasage.



Comme il a été vu précédemment, les générateurs de fréquence basés sur le procédé de synthèse utilisent comme élément de sortie un modulateur soustractif suivi d'un filtre passe bas et éventuellement d'un amplificateur.

La figure 6 représente le principe d'un générateur-synthétiseur possédant deux sorties déphasables numériquement l'une par rapport à l'autre.

On voit que le modulateur soustractif M_1 , alimenté sur ses deux entrées, d'une part par la fréquence sinusoïdale $F_0 + F$, et d'autre part par un signal carré à la fréquence F_0 issue du compteur, joue exactement le même rôle que dans le procédé de synthèse précédemment décrit.

Après franchissement du filtre passe-bas PB_1 , de l'amplificateur A_1 , la sortie S_1 délivre une tension sinusoïdale à la fréquence F .

L'ensemble du compteur de capacité 360 alimenté par une fréquence égale à $360 \times F_0$ possède un circuit de coïncidence N agencé de telle sorte qu'un second signal carré de même fréquence F_0 soit appliqué au modulateur M_2 , signal carré dont le déphasage par rapport au signal carré alimentant M_1 est réglable numériquement, unité par unité, c'est-à-dire degré par degré.

Si les circuits M_2 , PB_2 , et A_2 sont identiques aux circuits de la voie $M_1 - PB_1 - A_1$, la sortie S_2 délivrera un second signal de même fréquence F mais dont le déphasage par rapport au signal de la sortie S_1 sera égal à la valeur numérique N exprimée en degrés.

On voit donc que ce procédé permet d'obtenir deux ou plusieurs signaux déphasés, le déphasage étant indépendant de la fréquence délivrée et étant effectué numériquement à l'aide de circuits logiques fonctionnant à fréquence constante.

4) Les données fondamentales de la conception des appareils :

S'appuyant sur les considérations générales que nous avons tout d'abord exposées et exploitant des principes et procédés tels que ceux que nous venons de citer, les caractères fondamentaux de générateurs de signaux électriques de conception moderne peuvent se résumer comme suit :

- **Commodité de réglage et de lecture** : par l'affichage numérique direct des grandeurs désirées.
- **Précision, définition** : nombre de chiffres aussi élevé qu'on le désire, compatible avec la stabilité des éléments étalons.

- **Stabilité** : dépendant d'un minimum d'éléments étalons. L'élément étalon, **unique pour les générateurs**, peut être, par exemple, un quartz thermostaté permettant d'atteindre des stabilités de l'ordre de 10^{-9} à 10^{-10} .

Il est également très aisé, pour certaines applications, d'y substituer une source de référence à haute performance, telle qu'un étalon atomique.

- **Programmation, télécommande, automatisme** : aisément réalisés par action directe sur les circuits numériques (compteurs à capacité variable, compteurs prédéterminés...).

- **Multiplicité des fonctions** : par l'association judicieuse de circuits numériques et linéaires.

- **Technologie intégrée** : pratiquement accessible à la quasi-totalité des équipements électroniques exploitant des circuits logiques (Techniques numériques).

- **Faibles poids, encombrement, consommation et dissipation** : par l'emploi de composants de micro-électronique.

- **Standardisation et normalisation poussées** : structures mécaniques, composants, codes et niveaux d'interconnexion...
C'est à ces caractères généraux que répondent les nouveaux instruments que nous décrivons ci-après.

III — EXEMPLES DE REALISATIONS INSTRUMENTALES - PERFORMANCES - APPLICATIONS

Spécifications communes à tous les instruments :

- **Circuits de programmation** :

Entrées codées : DCB 1-2-4-8

Niveau logique « 0 » : -1 V à $+0,5\text{ V}$

Niveau logique « 1 » : $+6\text{ V} \pm 1,5\text{ V}$

Impédance d'entrée : $4.700\ \Omega \pm 20\%$

- **Alimentation universelle** : 115 - 127 - 220 V/50 à 400 Hz

- **Structures mécaniques normalisées — Adaptation au montage en rack**

- **Utilisation de circuits logiques intégrés (décades)**

1) Divers générateurs de fréquence, de 0,01 Hz à 60 MHz utilisant les procédés de synthèse :

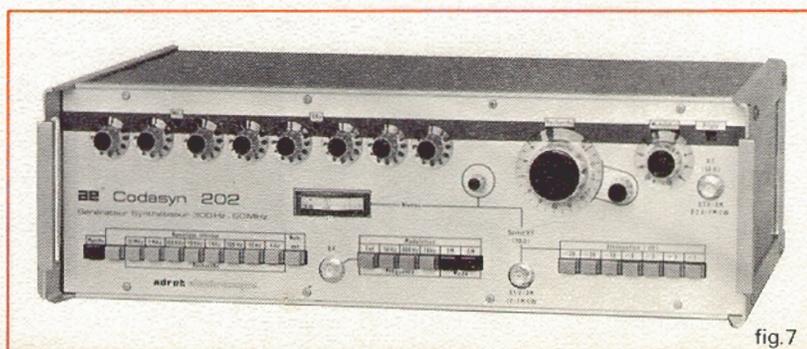


fig.7

a) **Générateur-Synthétiseur 60 MHz** (représenté figure 7) :

● **Domaines d'utilisation** : instrument de hautes performances au champ d'application très étendu :

- Télécommunications, radar, télésures,
- Etude, contrôle et réglage des filtres,
- Résonance magnétique nucléaire,
- Pilotage d'émetteurs (réglage, télécommande),
- Etalon de laboratoire,
- Recherche médicale,
- Contrôles et tests automatiques...

● **Gamme de fréquence** : 300 Hz à 60 MHz

● **Affichage numérique** (définition) - 8 chiffres : par pas de 1 Hz à 10 MHz, en rapports décimaux

N.B. : l'utilisation d'un compteur électronique auxiliaire permet, si nécessaire, d'atteindre la définition de 0,001 Hz.

● **Stabilité de fréquence** (par quartz) :

- ≥ 10^{-7} par 24 heures (première option)
- ≥ 2.10^{-9} par 24 heures (seconde option)

● **Pilotage extérieur** (éventuel) : tout étalon de fréquence 1 ou 5 MHz.

● **Tension de sortie** :

Non modulée ou F.M. : 1 V/50 Ω

A.M. : 0,5 V/50 Ω

● **Atténuateur de sortie** :

0 à -60 db, par atténuateur à touches + vernier.

● **Signaux parasites** :

Bruit de phase : -70 db

Signaux non harmoniques : -80 db

Signaux harmoniques : -34 db

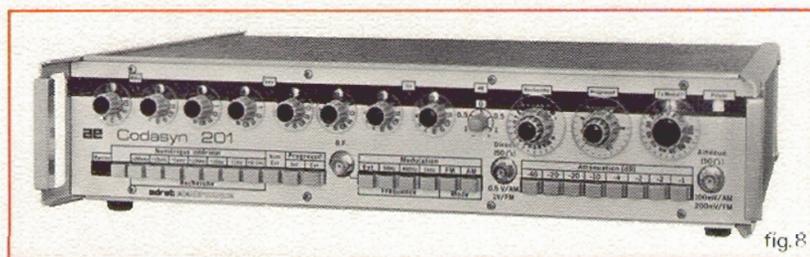
● **Modulations A.M. et F.M.** :

Par générateur interne : 50 — 400 — 1.000 Hz

Par générateur externe : ± 5 V (crête), utilisation en wobulateur.

● **Temps de réponse en programmation** : 0,2 ou 1 milliseconde

● **Consommation** : 60 VA.



b) **Générateur-Synthétiseur 2 MHz** (représenté figure 8) :

● **Domaines d'utilisation** :

Identiques au modèle précédent mais dans une bande de fréquence plus réduite.

● **Gamme de fréquence** : 0,1 Hz à 2 MHz.

● **Affichage numérique** : 8 chiffres :

Par pas de 0,1 Hz à 1 MHz (possibilité de résolution à 0,001 Hz à l'aide d'un compteur électronique extérieur).

● **Stabilité de fréquence** (par quartz) :

- ≥ 10^{-7} par 24 heures (option 1)
- ≥ 2.10^{-9} par 24 heures (option 2).

- **Pilotage extérieur** (éventuel) : tout étalon de fréquence, 100 kHz ou 1 MHz.
- **Tension de sortie** :
Non modulée ou F.M. : 1 V/50 Ω
A.M. : 0,5 V/50 Ω
- **Atténuateur de sortie** :
0 à — 100 db, par atténuateur à touches + vernier.
- **Signaux parasites** :
Bruit de phase : — 60 db
Signaux non harmoniques : — 70 db
Signaux harmoniques : — 40 db
- **Modulations A.M. et F.M.** :
Par générateur interne : 50 — 400 — 1.000 Hz
Par générateur externe : \pm 5 V (crête), utilisation en wobulateur.
- **Temps de réponse en programmation** : 0,2 ou 1 milliseconde
- **Consommation** : 50 VA.



fig.9

c) **Généralisateur-Synthétiseur 100 kHz** (représenté figure 9) :

- **Domaines d'utilisation** : appareil de faibles dimensions, limité aux domaines de la basse fréquence :
 - Relevé des courbes de réponses de filtres ou réseaux actifs ou passifs,
 - Télémessure, téléphonie, télécommunications,
 - Electroacoustique,
 - Electronique médicale,
 - Essais de vibrations...
- **Gammes de fréquence** : 0,1 Hz à 100 kHz
en 3 gammes : 0,1 Hz à 1 kHz — 1 Hz à 10 kHz — 10 Hz à 100 kHz
- **Affichage numérique** — 4 chiffres : par pas de 0,1 - 1 et 10 Hz
- **Stabilité de fréquence** : $\geq 3 \cdot 10^{-5}$ (à long terme)
- **Pilotage extérieur** (éventuel) : tout étalon de fréquence 1 MHz.
- **Tension de sortie** (réglable de façon continue)
0 à 2,5 V/50 Ω / 600 Ω
- **Signaux parasites** :
Signaux non harmoniques : — 60 db
Signaux harmoniques : — 40 db

- Possibilité de wobulation : par tension extérieure 0 à + 6 V
- Temps de réponse en programmation : 5 millisecondes
- Consommation : 8 VA.



2) Générateur étalon de tension continue 10 μ V à 100 V (représenté figure 10)

- **Domaines d'utilisation :**
Instrument de haute précision utilisé principalement pour les opérations d'étalonnage :
 - Etalon de laboratoire (pour voltmètres électroniques, par exemple)
 - Etude de linéarité des amplificateurs,
 - Référence pour voltmètre différentiel,
 - Simulation de servomécanismes, capteurs, etc. (en programmation)
- **Gamme de tension :** 10 μ V à 100 V
en 2 gammes : 10 μ V à 10 V — 100 μ V à 100 V
- **Affichage numérique :** 6 chiffres
- **Courant de sortie :** 0 à 50 mA (courant de court-circuit inférieur à 75 mA)
- **Précision :** Gamme 10 V : $3 \cdot 10^{-5} \pm 100 \mu$ V
Gamme 100 V : $5 \cdot 10^{-5} \pm 1$ mV
- **Stabilité (sur 7 jours) :** Gamme 10 V : $1,5 \cdot 10^{-5} \pm 50 \mu$ V
Gamme 100 V : $2,5 \cdot 10^{-5} \pm 0,5$ mV
- **Linéarité :** Gamme 10 V : $1,3 \cdot 10^{-5}$
Gamme 100 V : $2 \cdot 10^{-5}$
- **Bruit (signal parasite) :** Gamme 10 V : $\leq 50 \mu$ V
Gamme 100 V : $\leq 150 \mu$ V
- **Isolement :**
 ± 500 V entre bornes de sortie et la masse (> 1.000 M Ω)
Réjection du mode commun : > 120 db.
- **Résistance interne :**
en continu $< 0,002 \Omega$
Impédance dynamique : $R \leq 15 \Omega/3$ mH
- **Temps de réponse en programmation :** 5 millisecondes.
- **Consommation :** 35 VA.

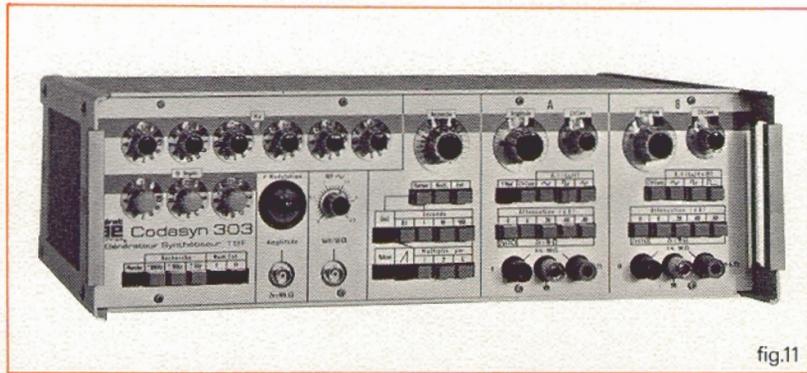


fig.11

3) Générateur-synthétiseur BF/TBF (représenté figure 11):

- **Domaines d'utilisation :**

- Servo mécanismes
- Vibrations de structures
- Calculateurs et simulateurs analogiques
- Processus industriels
- Recherche géophysique
- Recherche médicale
- Filtres et réseaux correcteurs BF/TBF
- Capteurs de déplacement, de vitesse, d'accélération, etc.

- **Gamme de fréquence :**

- Sortie référence et sortie déphasage : 000,001 Hz à 999,999 Hz par pas de 0,001 Hz.
- Sortie auxiliaire ($10 \times f$ affiché) : 0000,01 Hz à 9999,99 Hz par pas de 0,01 Hz.

- **Déphasage :**

- de 0 à 359 degrés par affichage numérique, degré par degré, **précision** $\pm 0,1$ degré entre sinusoides, ± 1 degré entre carrés, ± 2 degrés entre triangles et autres signaux.

- **Signaux délivrés :**

- Sortie référence : Sinusoïdes — Carrés — Triangles ou une porteuse extérieure modulée par l'un des trois signaux précédents.
- Sortie déphasable : sinusoïdes — carrés — impulsions.
- Sortie auxiliaire : sinusoïdes.

- **Stabilité en fréquence :**

- $\pm 3.10^{-5}$ de 0 à $+ 50$ °C.

- **Caractéristiques des circuits de sortie :**

- Deux sorties symétriques avec point milieu à la masse :
- Sortie référence : phase 0 et phase π .
- Sortie déphasable : phase 0 + θ et phase $\pi + \theta$
- Niveau de sortie : 30 V crête à crête sur 100 Ω sur chaque sortie
- Impédance de charge : $2 \times 100 \Omega$ mini pour chaque sortie
- Impédance de sortie : 10 Ω avec atténuation ou $< 1 \Omega$ sans atténuation
- Atténuateur sur les deux sorties : 0-20-40-60 dB + potentiomètre d'interpolation
- Composante continue : réglable de ± 15 V
- Sortie auxiliaire : 10 fois la fréquence affichée : 0-2,5 V_{eff} sur 50 Ω

- **Signaux parasites :**

- Composantes non harmoniques :
 - sans wobulation : 85 dB avec wobulation : 70 dB
- Composantes harmoniques :
 - sans wobulation : 55 dB avec wobulation : 50 dB

● **Modulation de porteuse :**

- Niveau d'entrée : 3 — 100 V eff. sur 10 k Ω
- Fréquence de la porteuse de 0 à 10 kHz

● **Wobulation :**

- Permet de faire varier la fréquence de ± 1 Hz, ± 10 Hz ou ± 100 Hz autour de la fréquence affichée
 - par signal extérieur : ± 5 V crête/10 k Ω
 - en manuel,
 - en automatique par dents de scie ou triangle internes, relaxés ou déclenchés, par un signal extérieur ou manuellement

Programmation numérique de la fréquence :

- 6 chiffres codés DCB 1-2-4-8
- Niveau logique « 0 » : — 1 V à + 0,5 V
- Niveau logique « 1 » : + 6 V $\pm 1,5$ V
- Impédance d'entrée : 4.700 $\Omega \pm 20$ %

Programmation numérique de la phase :

- 3 chiffres codés DCB 1-2-4-8
- mêmes niveaux logiques et même impédance que ci-dessus.

Alimentation :

- 115 - 127 - 220 V eff. 50 à 400 Hz
- 70 VA environ.

Dans le cas de l'alimentation par convertisseur en signaux carrés l'amplitude doit être de 155 V crête sur la position 115 V.

Dimensions :

- Hauteur : 132 mm
- Largeur : 440 mm
- Profondeur hors-tout : 340 mm
- Adaptation rack standard 19"
- Masse : 10 kg environ.

4) **Equipements périphériques de programmation et accessoires pour générateurs numériques :**

a) **Programmateurs :**

Comme nous l'avons vu, tous les instruments cités sont munis de connecteurs de programmation permettant, éventuellement, de les inclure dans un ensemble complexe d'automatisme, de calcul, ou d'optimisation. Mais cette faculté de programmation peut être très utilement mise à profit dès qu'un instrument est appelé à être utilisé de manière plus ou moins répétitive. Tel est le cas, par exemple, de l'utilisation à un poste de contrôle ou de réglage dans une chaîne de production, voire même le cas de certaines études de laboratoire.

Tout en conservant un mode d'utilisation manuel, il est alors plus sûr et plus rapide de disposer d'une « mémoire » intermédiaire constituée par un clavier à touches, chacune d'elles correspondant à une valeur préalablement fixée et éventuellement modifiable. Le gain de temps des manipulations et l'élimination de tous risques d'erreurs peuvent ainsi conduire à des économies pouvant atteindre 90 % du coût des opérations de contrôle, de mesure ou de test.

C'est à cette fin qu'ont été réalisés, pour tous les instruments, des programmeurs tels que celui représenté figure 10.

Ces programmeurs permettent de prédéterminer, individuellement, 8 valeurs différentes de fréquences ou de tension. Ils peuvent, de plus, être montés en cascade, en nombre quelconque, pour un nombre également quelconque de valeurs prédéterminées.

b) **Afficheurs numériques :**

Les appareils programmés étant « aveugles » lors de leur utilisation en programmation, il peut être utile et commode de visualiser et ainsi, de pouvoir contrôler, chaque valeur de consigne issue d'un programmeur.

Ces afficheurs permettent également le téléaffichage des informations dans l'utilisation directe des instruments.

La figure 11 représente un ensemble standard, constitué par un instrument, un programmeur et un afficheur, tel qu'il se présente à un poste de contrôle et réglages répétitifs par exemple.

c) Autres accessoires :

En vue d'exploiter au mieux les possibilités offertes par les instruments de base et d'augmenter éventuellement certaines performances, d'autres accessoires ont été réalisés, tels que :

- **Un atténuateur programmé, 0 à 99 dB** par pas de 1 dB, pour la programmation éventuelle de la tension de sortie des générateurs-synthétiseurs.
- **Des programmeurs doubles** (tensions, fréquences),
- **Des programmeurs spécifiques** pour signaux standard de télé mesure,
- **Un réducteur de tension, de rapport 1/100**, comme accessoire du générateur étalon de tension (gamme 0,1 μ V à 0,1 V) pour les mesures et étalonnages de très faibles tensions,
- **Un générateur d'harmoniques 0 à 100 MHz**, accessoire commun des générateurs-synthétiseurs 2 MHz à 60 MHz,
- etc.

