

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 47 (1956)
Heft: 2

Artikel: Installation de téléaffichage, télécommande et d'asservissement à l'aide des appareils synchrones
Autor: Müller, M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058189>

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: 25.12.2024

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

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

ORGANE COMMUN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS (ASE) ET
DE L'UNION DES CENTRALES SUISSES D'ELECTRICITE (UCS)

Installations de téléaffichage, télécommande et d'asservissement à l'aide des appareils synchros

Par M. Müller, Zurich

621.3.083.7 + 621.398 : 621.3.025.3

I. Généralités

Au fur et à mesure que les installations techniques se compliquent, il devient de plus en plus nécessaire de pouvoir surveiller et commander d'un poste central le fonctionnement de toutes les parties de l'installation, même les plus éloignées. Lorsqu'il s'agit d'une grandeur électrique, sa télémesure ne présente généralement pas de difficulté, mais il n'en est pas de même pour des grandeurs non électriques. En pratique, toutes les valeurs à mesurer peuvent être transformées en déplacements angulaires, de sorte que la télétransmission d'angles acquiert une importance particulière. En outre, parmi toutes les grandeurs physiques, le déplacement angulaire se distingue par le fait qu'il peut prendre des valeurs positives ou négatives aussi élevées que l'on veut, toutefois avec un certain degré d'ambiguïté.

Dans ce qui suit, nous décrirons un procédé de transmission d'angles, qui offre l'avantage d'être extrêmement précis et sûr. Son principe est connu depuis fort longtemps, mais ce n'est qu'au cours des dernières années que ce procédé a été perfectionné et est devenu d'un emploi courant, de sorte qu'il est intéressant d'en examiner les caractéristiques et les possibilités d'application. Il s'agit du système synchrone à liaison inductive dont les éléments sont fabriqués sous les marques déposées les plus diverses (Selsyn, Autosyn, Diadex, Magslip, etc.).

Ces éléments, qui sont parfois désignés par le terme générique de synchro-machines, sont des transformateurs rotatifs dont le couplage entre enroulements rotoriques et statoriques peut être modifié, comme dans le cas d'un régulateur à induction, par modification de leurs positions respectives. La grandeur et le poids de ces machines sont de plus en plus réduits. La fig. 1 montre quelques-unes des exécutions actuelles.

Selon la construction et le genre d'enroulements, on distingue les formes d'exécution suivantes ¹⁾:

¹⁾ Voir Appendice.

Synchro-transmetteurs
Synchro-récepteurs
Synchro-détecteurs
Transmetteurs différentiels
Récepteurs différentiels
Resolver

Une liaison autosynchrone de la valeur de mesure se compose d'un transmetteur et d'un ou de

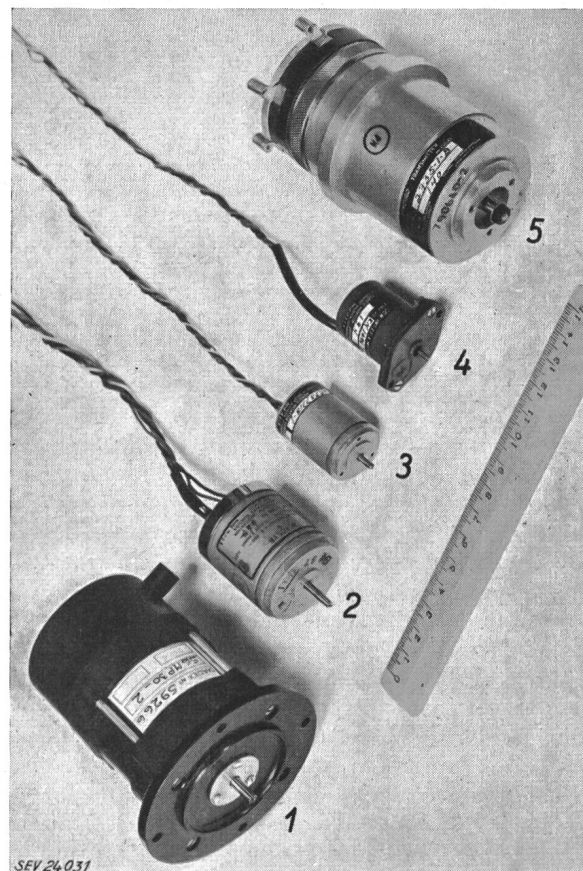


Fig. 1

Diverses exécutions d'appareils synchros

- 1 Type industrielle, 50 Hz; 2 Exécution miniature, 400 Hz;
3 Exécution subminiature, 400 Hz; 4 Servomoteur miniature,
400 Hz; 5 Synchro selon les normes militaires, 50/60 Hz.

plusieurs autres appareils. Le resolver occupe une position spéciale et est généralement utilisé seul. Nous considérerons tout d'abord la combinaison d'un transmetteur et d'un synchro-détecteur.

2. Transmetteur et synchro-détecteur

Le transmetteur et le synchro-détecteur ont tous deux une construction analogue à celle d'un moteur courant. Le stator porte trois enroulements décalés de 120° et couplés généralement en étoile. Le bobinage du rotor est monophasé, avec alimentation par bagues et balais. Le rotor du transmetteur est excité par du courant alternatif (fig. 2). Le flux alternatif B qui en résulte induit, dans les enroulements statoriques, des tensions dont la valeur dépend de leur position angulaire par rapport au champ inducteur, c'est-à-dire à l'enroulement rotorique. Les courants ainsi créés dans les bobines statoriques du synchro-détecteur engendrent à leur

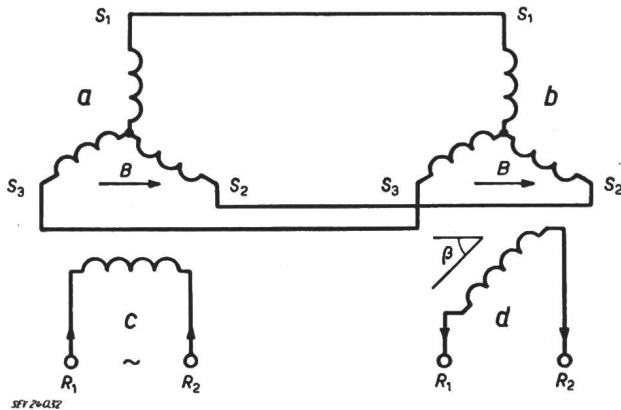


Fig. 2

Liaison autosynchrone composée d'un synchro-transmetteur et d'un synchro-détecteur

a synchro-transmetteur; b synchro-détecteur; c excitation; d signal d'erreur

S_1, S_2, S_3 Bornes de connexion des enroulements des stators; R_1, R_2 Bornes de connexion des enroulements des rotors; B Direction de champs magnétique alternatif β angle compris entre l'enroulement du rotor et la direction du champs magnétique

tour des champs alternatifs, dont l'addition vectorielle donne un champ résultant, qui occupe par rapport au stator la même position que celle du champ engendré dans le transmetteur par le courant rotorique. A chaque position du rotor du transmetteur correspond une nette répartition de la tension dans les trois bobines statoriques, qui est proportionnelle au cosinus de l'angle intermédiaire. Les trois tensions induites ne diffèrent que par leur valeur et, éventuellement, par leur signe, tandis qu'il ne se produit *aucun* déphasage entre elles. Si cela n'était pas le cas, il existerait également un champ tournant magnétique lorsque le rotor du transmetteur est arrêté et le synchro-détecteur ne posséderait plus aucune position de zéro.

La tension induite dans le rotor du synchro-détecteur est donc proportionnelle au cosinus de l'angle β que forment le champ magnétique et l'axe des bobines. Convenablement amplifiée, cette ten-

sion peut être appliquée à un servomoteur, qui fait alors tourner le rotor du synchro-détecteur avec une charge qui lui est accouplée, jusqu'à ce que la tension de sortie de ce détecteur (signal d'erreur) soit devenue nulle, ce qui est le cas lorsque les deux axes du transmetteur et du synchro-détecteur ont entre eux un angle de $\pm 90^\circ$, tandis que les stators occupent la même position. L'une des positions zéro est incorrecte de 180° , mais elle est toutefois instable à cause de la position de phase de la tension

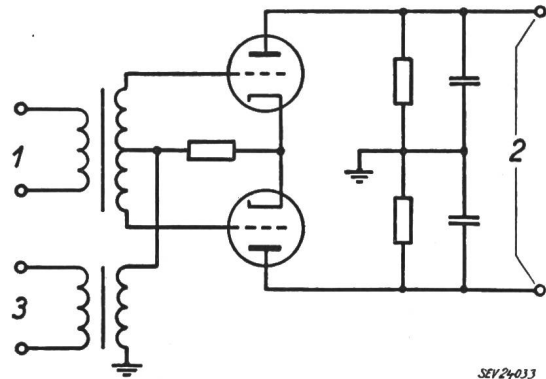


Fig. 3

Démodulateur de phase

1 Entrée du signal d'erreur provenant du synchro-détecteur
2 Sortie du signal d'erreur démodulé
3 Entrée du signal de référence, en phase avec l'excitation du synchro-transmetteur

de sortie du synchro-détecteur, lorsque le sens de rotation du servomoteur dépend de la phase de commande. Cette condition est remplie, par exemple, quand il s'agit d'un moteur asynchrone diphasé. On peut également utiliser un moteur à courant continu alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur dont le fonctionnement dépend de la phase de commande (fig. 3).

Lorsqu'une grande précision de réponse est exigée, le circuit de réglage doit présenter une forte amplification. Pour éviter une auto-excitation, il faut alors prévoir un amortissement artificiel, par exemple à l'aide d'une contre-réaction tachymétrique, ce qui s'obtient avantageusement avec un petit alternateur asynchrone, excité de façon que sa tension de sortie soit en phase avec le signal d'erreur de la transmission synchrone et fournissant une tension proportionnelle à la vitesse, à fréquence constante (fig. 4 et 5). Une disposition de ce genre

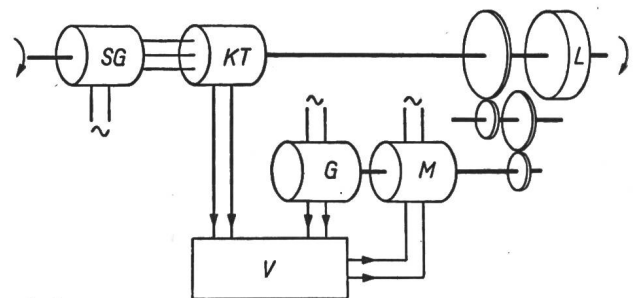


Fig. 4

Asservissement de position avec appareils synchrones et amortissement à l'aide d'une contre-réaction tachymétrique
SG synchro-transmetteur; KT synchro-détecteur; G génératrice tachymétrique asynchrone; M moteur d'asservissement; L charge sur l'arbre asservi; V amplificateur

permet d'atteindre aisément une précision de l'ordre d'un degré, ce qui suffit dans la plupart des cas. Pour des précisions encore plus élevées, on peut prévoir une chaîne auxiliaire, accouplée à la chaîne principale par un engrenage. A la position

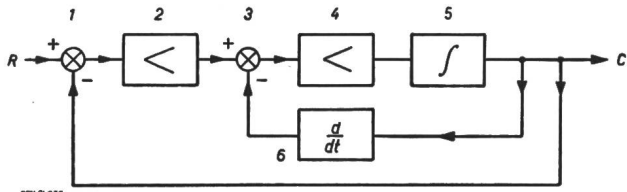


Fig. 5

Schéma bloc d'un asservissement selon la fig. 4

R grandeur de référence (grandeur d'entrée); C grandeur asservie (grandeur de sortie); 1 comparateur (élément de soustraction); 2 amplificateur; 3 élément de soustraction; 4 amplificateur; 5 élément intégrateur (p. ex. moteur) 6 élément différentiateur (p. ex. génératrice tachymétrique)

zéro correcte, les tensions de sortie des deux synchro-détecteurs doivent être nulles simultanément. On amène tout d'abord la chaîne principale

seau, afin d'éviter un calage à des positions zéro incorrectes (fig. 8 et 9). Une autre possibilité consiste à utiliser un montage à bascule électronique avec thyratrons, qui agit en cas de dépassement d'une certaine tension d'erreur dans la chaîne prin-

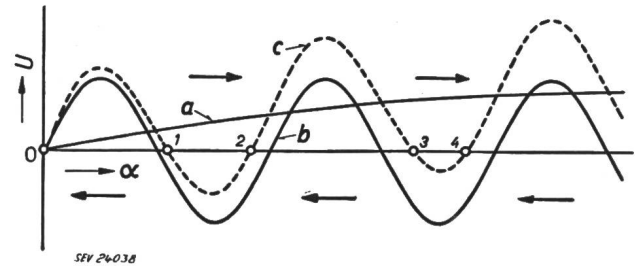


Fig. 8

Calage à des positions zéro incorrectes lors de la superposition directe des signaux d'erreur de la chaîne principale et de la chaîne auxiliaire

U signal d'erreur; α erreur angulaire; a signal d'erreur de la chaîne principale; b signal d'erreur de la chaîne auxiliaire; c superposition des signaux; 0 position zéro correcte; 1...4 zéros incorrects, dont 1 et 3 sont instables, 2 et 4 stables. Les sens de rotation du servomécanisme entre les positions zéro sont indiqués par des flèches

Fig. 6

Schéma d'un asservissement de position à l'aide des appareils synchros en chaîne double

SG synchro-transmetteur; KT synchro-détecteur; M servo-moteur; S commutateur, commandée par l'amplitude du signal d'erreur de la chaîne principale; R grandeur d'entrée; C arbre asservi (grandeur de sortie); 1 chaîne principale; 2 chaîne auxiliaire

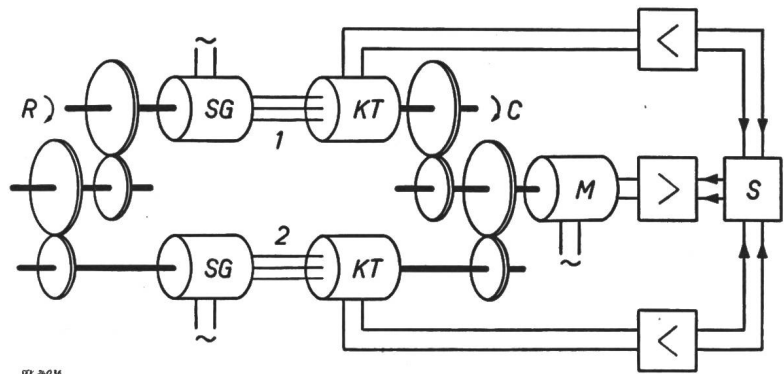


Fig. 6

à zéro, puis on commute sur la chaîne auxiliaire (fig. 6). Une commutation directe, par exemple avec des relais, peut être évitée en utilisant des éléments non linéaires. La fig. 7 indique le montage d'un réseau où il est fait usage de ce procédé, la résistance d'un élément redresseur diminuant quand

principale. Selon que l'un ou l'autre des thyratrons est conducteur à l'instant considéré, c'est la tension anodique du préamplificateur de la chaîne principale ou celle de celui de la chaîne auxiliaire qui sera enclenchée. Dans ce cas également, il faut prévoir une compensation spéciale pour éviter un calage à des positions zéro incorrectes.

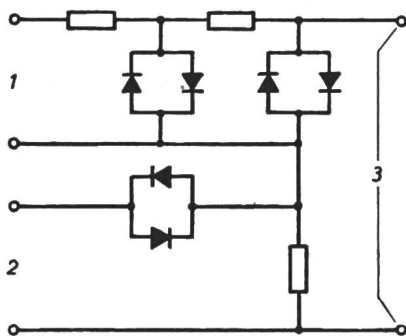


Fig. 7

Réseau non-linéaire utilisé comme commutateur de la chaîne principale à la chaîne auxiliaire

1 du synchro-détecteur principal; 2 du synchro-détecteur auxiliaire; 3 à l'amplificateur d'asservissement

la tension de service augmente. Les tensions de service des deux chaînes, ainsi que le rapport de transmission de celles-ci, ne peuvent toutefois plus être librement choisis, mais doivent être adaptés au ré-

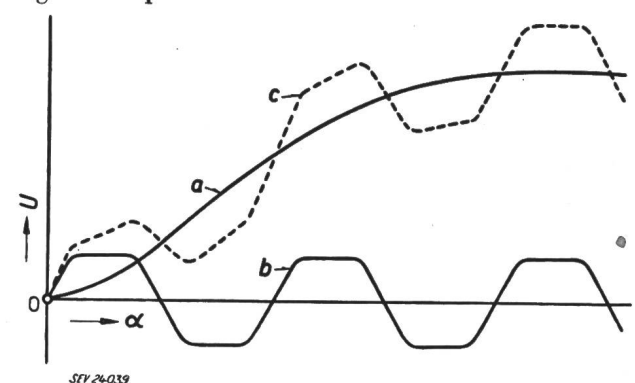


Fig. 9

Les calages à des positions zéro incorrectes sont évités par l'emploi d'un réseau non-linéaire selon la fig. 7

Légende voir fig. 8

Comme nous l'avons indiqué, le transmetteur et le synchro-détecteur ont, en principe, la même construction et il existe effectivement des synchro-machines qui peuvent servir indifféremment pour

l'un et l'autre. En général, cela n'est toutefois pas le cas, car les synchro-détecteurs sont fortement ohmiques, afin de charger le moins possible les transmetteurs dans le cas d'un fonctionnement en parallèle de plusieurs synchro-détecteurs et de pouvoir loger dans le rotor un grand nombre de spires pour obtenir une tension de sortie élevée. D'autre part, à cause de la différence dans la construction des rotors, un transmetteur ne peut généralement pas être utilisé comme synchro-détecteur. La fig. 10

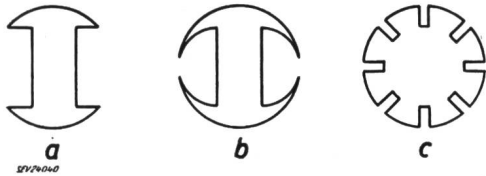


Fig. 10

Différentes exécutions des rotors des appareils synchrones
a rotor en navette; b rotor en navette à cornes longues;
c rotor encoché

montre en coupe trois types de rotors de synchro-machines. Pour des transmetteurs, la construction normale est celle du rotor en navette. Dans un synchro-détecteur, un rotor de ce genre présenterait un grand entrefer à la position neutre, de sorte que le courant magnétisant dans le stator serait trop élevé. En outre, l'impédance à l'entrée du synchro-détecteur se modifierait avec la position du rotor, ce qui affecterait la symétrie et par conséquent la précision. Pour ce motif, tous les synchro-détecteurs récents ont un rotor encoché. Il va de soi que les synchro-machines servant de transmetteurs ou de synchro-détecteurs doivent également posséder un rotor encoché. Le type à bobinage en forme de navette en cornes longues était une solution transitoire, qui est maintenant abandonnée.

3. Transmetteur et récepteur de téléaffichage et de télécommande (arbre électrique)

Lorsque l'on couple deux appareils synchrones en opposition, comme l'indique la fig. 11, et que l'on excite les deux rotors par le même réseau, des

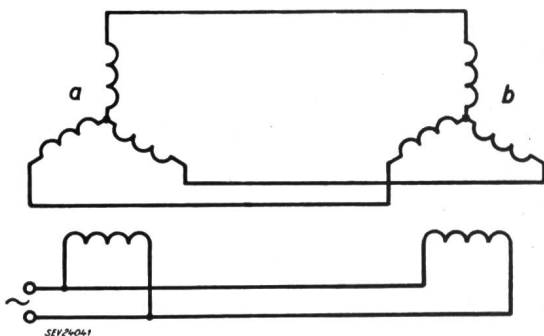


Fig. 11

Liaison autosynchrone composée d'un transmetteur et d'un récepteur de téléaffichage ou de télécommande (arbre électrique)

a synchro-transmetteur; b synchro-récepteur

tensions sont induites dans les deux stators par le rotor. Si les deux rotors sont alignés géométriquement, les tensions induites correspondent et il ne circule aucun courant dans les conducteurs reliant

les enroulements statoriques. Mais, aussitôt que l'on déplace l'un des rotors, les tensions induites dans les stators deviennent inégales et un courant d'équilibre commence à circuler et tend à rétablir le synchronisme. Il s'agit là d'un arbre électrique à phase bloquée.

Selon la grandeur des machines, des couples importants peuvent être transmis. Des synchro-récepteurs d'installations de télémesure servent souvent uniquement pour déplacer soit une aiguille, soit un disque gradué. La fig. 12 indique, à titre d'exemple,

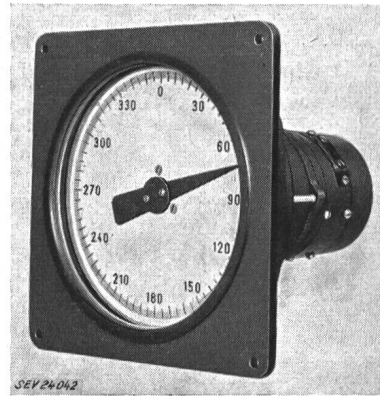


Fig. 12

Récepteur de téléindication pour des positions angulaires
Exécution industrielle (Système Précilec)

un téléindicateur de positions angulaires. Des appareils indicateurs pour d'autres grandeurs transformables en déplacements angulaires ont exactement la même construction et ne diffèrent que par le genre d'échelle. Étant donné que l'angle de rotation ne dépasse pas 360° dans ce cas, l'amenée du courant au rotor peut également avoir lieu par des ressorts en spirale au lieu de bagues, ce qui évite le frottement. Des appareils indicateurs de ce genre, en exécution plus légère, sont très utilisés en aéronautique.

Les synchro-récepteurs fonctionnant à la fréquence du réseau sont généralement équipés en outre d'un amortisseur, dont le but est d'arrêter plus rapidement les oscillations. Cet amortisseur consiste le plus souvent en une masse ayant à peu près le même moment d'inertie que le rotor. Cette masse est montée sur l'arbre du rotor, auquel elle est reliée par un accouplement à friction. Pour le reste, la construction du transmetteur et celle du récepteur sont identiques. Avec un transmetteur amplement dimensionné, il est également possible de faire fonctionner plusieurs récepteurs en parallèle.

Le couple transmis est proportionnel au sinus du déplacement angulaire de l'un des rotors par rapport à l'autre [4]²⁾. L'angle de dérive qui résulte d'un tel arbre électrique dépend, pour un couple de charge déterminé, du couple produit par le synchro-récepteur par unité d'erreur angulaire. Cette valeur est une constante de la machine. L'arbre électrique est élastique. Au fur et à mesure que le décalage angulaire augmente, l'intensité du

²⁾ Voir la bibliographie en fin d'article.

courant rotorique augmente et peut même provoquer un échauffement inadmissible lorsque le rotor est longtemps maintenu à une erreur angulaire de 90°. Ces relations sont illustrées par la fig. 13.

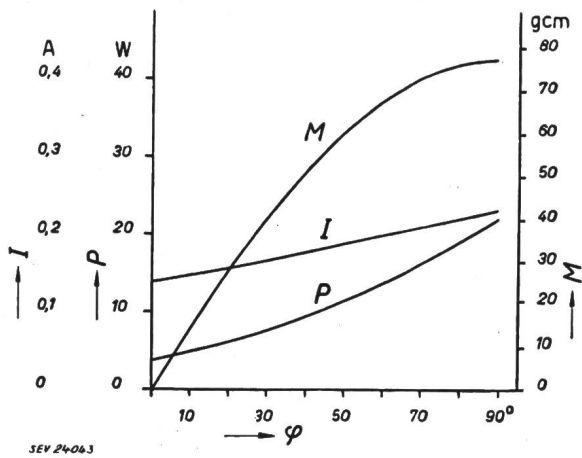


Fig. 13

Couple M , intensité I et puissance P d'un récepteur de téléaffichage en fonction de l'angle de dérive φ (erreur angulaire de l'arbre électrique)

4. Synchro-différentiels

Dans un synchro-différentiel, le rotor est également triphasé. Le stator du différentiel est relié à celui du transmetteur (fig. 14) et son rotor au stator du synchro-détecteur ou du synchro-récepteur. Avec ce montage, le différentiel fonctionne en transformateur, les enroulements statoriques faisant l'office d'enroulements primaires. En principe, on pourrait également alimenter le rotor. Toutefois, pour compenser les pertes qui se produisent dans le différentiel, le rapport de transformation est légèrement différent de 1:1 et c'est généralement le rotor qui porte le plus grand nombre de spires.

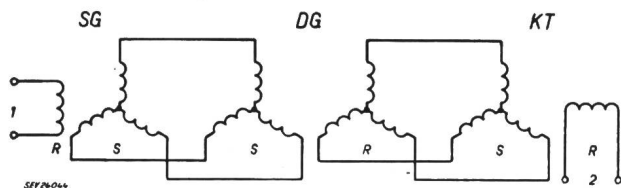


Fig. 14

Liaison autosynchrone avec transmetteur différentiel comme élément additif ou soustractif

SG synchro-transmetteur; DG transmetteur différentiel; KT synchro-détecteur; S stator; R rotor; 1 excitation; 2 signal d'erreur

Lorsque le rotor du différentiel est déplacé, la valeur des tensions induites dans les divers enroulements rotoriques varie. Le synchro-détecteur ou le synchro-récepteur comporte de ce fait une position zéro, qui correspond à la somme des déplacements angulaires du transmetteur et du différentiel. En permutant deux lignes de stator, on peut obtenir que les deux déplacements angulaires se soustraient au lieu de s'additionner. Des transmetteurs différentiels servent notamment d'organes d'addition ou de soustraction dans des calculateurs analogiques.

Lorsque le différentiel est inséré entre deux transmetteurs, il fonctionne en récepteur et occupe

une position qui correspond, selon le montage, à la somme ou à la différence des déplacements angulaires des deux transmetteurs. En général, les moteurs différentiels sont également équipés d'amortisseurs.

5. Resolver

Le déphaseur, resolver ou transformateur de coordonnées est essentiellement une machine «sinus-cosinus». Le stator porte deux enroulements décalés de 90° et le rotor un enroulement ou parfois deux enroulements décalés à angle droit, comme ceux du stator. Ces resolvers sont surtout utilisés dans des calculateurs analogiques et comme déphaseurs de précision.

Pour l'utilisation en déphaseur proprement dit, les bobines statoriques sont alimentées par deux tensions alternatives, déphasées de 90°. Le champ tournant magnétique ainsi produit induit dans l'enroulement rotorique une tension dont la position de phase correspond à l'angle que cet enroulement forme avec l'enroulement statorique servant de phase de référence (fig. 15). — La précision est,

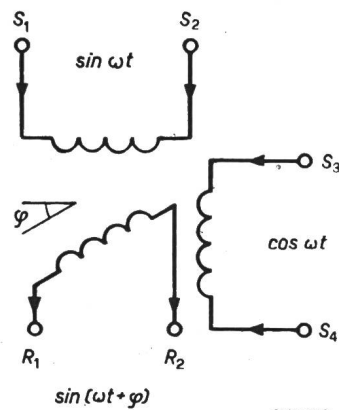


Fig. 15

Utilisation d'un resolver comme déphaseur de précision

$S_1...S_4$ bornes de connexion des enroulements du stator; R_1, R_2 bornes de connexion de l'enroulement du rotor; φ angle entre l'enroulement du rotor et un enroulement du stator

Tension induite dans le rotor (R_1, R_2):

$$\begin{aligned} \text{de l'enroulement } S_1-S_2: u_1 &= U \sin \omega t \cos \varphi \\ \text{de l'enroulement } S_3-S_4: u_2 &= U \cos \omega t \sin \varphi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_{1+2} &= U \sin \omega t \cos \varphi + U \cos \omega t \sin \varphi \\ u_{1-2} &= U \sin (\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

dans ce cas également, de l'ordre de quelques dixièmes de degré. Inversement, on peut alimenter l'enroulement rotorique, déphaser de 90° la tension de sortie de l'un des enroulements statoriques et l'additionner à celle de l'autre enroulement. Le déphasage à l'aide d'un déphaseur est utilisé, par exemple, pour la navigation aérienne selon le système à coordonnées polaires (VOR), où le déphasage de la modulation à 30 Hz de deux signaux reçus indique immédiatement l'angle directeur sous lequel l'avion a été vu par un radiophare tournant.

D'autres types de synchro-machines conviennent également comme déphaseurs de précision. Ainsi, lorsque le stator d'un synchro-détecteur est alimenté en courant triphasé une tension de valeur constante est induite dans l'enroulement rotorique

et sa position de phase correspond exactement au déplacement angulaire.

Si l'on excite l'enroulement rotorique du déphaseur avec une tension U_r , les tensions U_x et U_y induites dans les enroulements statoriques correspondent aux angles intermédiaires ξ et $\eta = \xi + 90^\circ$, que forment les deux enroulements statoriques avec l'enroulement rotorique:

$$U_x = U_r \cos \xi$$

$$U_y = U_r \cos \eta = U_r \sin \xi$$

Le déphaseur provoque donc une transformation de coordonnées polaires en coordonnées cartésiennes (d'où son autre appellation de «transformateur de coordonnées»), ce dont il est souvent fait usage dans les calculateurs analogiques. La transformation peut également être inverse, en excitant les deux enroulements statoriques avec les tensions U_x et U_y , puis en faisant en sorte que le rotor soit tourné jusqu'à ce que la tension de sortie de l'enroulement rotorique atteigne sa valeur maximum ou que la tension dans un enroulement rotorique auxiliaire, décalé de 90° par rapport à l'enroulement principal, devienne nulle. Avec deux enroulements dans le rotor et deux dans le stator, on peut également obtenir la rotation d'un angle quelconque d'un système de coordonnées rectangulaires.

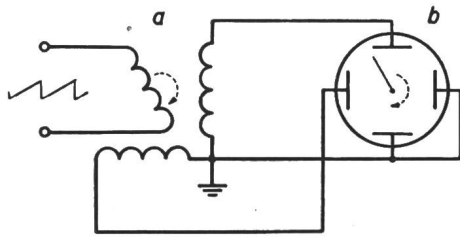


Fig. 16

Utilisation du resolver pour la transmission de l'angle d'azimut de l'antenne directive d'un radar au tube cathodique

a resolver; b tube cathodique à déviation électrostatique

Il y a lieu de mentionner encore une autre application du déphaseur. Si l'on relie, selon la fig. 16, les enroulements statoriques avec les plaques de déviation d'un tube de Braun et alimente l'enroulement rotorique du déphaseur avec une tension en dents de scie, par exemple, il apparaît sur l'écran fluorescent un trait dont la position correspond exactement à celle du déphaseur. Si l'on accouple l'arbre du déphaseur à l'antenne directive d'un appareil de radar et module la luminosité du rayon en fonction des impulsions réfléchies, on obtient un appareil de radar de surveillance de la forme la plus simple (Plan Position Indicator, PPI). Pour éviter des déformations de l'image, une large bande de fréquence doit pouvoir être transmise impeccablement par le déphaseur, selon la teneur en harmoniques de l'oscillation de relaxation. Certains modèles peuvent encore fonctionner à 70 kHz.

6. Précision

La précision d'une synchro-machine, c'est-à-dire son erreur, est exprimée en unités d'angle de dis-

persion et mesurée par comparaison avec une machine normale. Dans le cas d'un synchro-détecteur, on indique en outre la tension résiduelle non compensable en position zéro.

Les erreurs qui se produisent sont dues à des asymétries. Si les réactances des trois enroulements statoriques, leurs lignes de connexion ou les inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et le rotor sont inégales dans l'une des deux machines, on pourra encore obtenir la tension de sortie nulle, mais non plus celle à $\pm 90^\circ$, qui sera alors légèrement décalée. A la position zéro théorique, le rotor du synchro-détecteur présente encore une faible tension induite, qui est en phase avec le signal d'erreur normal. Si les impédances dans les enroulements statoriques ou leurs lignes de connexion sont inégales, un faible champ magnétique tournant s'ajoute au champ alternatif fixe, car une partie des flux dans les bobines statoriques ne sont alors plus seulement décalés dans l'espace, mais aussi dans le temps. Ce champ tournant induit dans le rotor du synchro-détecteur une tension dont la valeur est indépendante de la position du rotor. Il n'est donc plus possible d'obtenir une tension de sortie nulle. La position de phase de cette tension dépend de l'angle entre les rotors du transmetteur et du synchro-détecteur; à la position zéro théorique, elle est déphasée de 90° par rapport au signal d'erreur normal. En couplant un redresseur dont le fonctionnement dépend de la phase, ou un autre appareil de ce genre, à la suite du synchro-détecteur, l'influence de cette composante peut être éliminée, au moins en partie.

Lorsque le système est entraîné à vitesse constante, des tensions de rotation viennent s'ajouter aux tensions de transformation et provoquent une erreur supplémentaire. Aux faibles vitesses, on a tout d'abord affaire à une tension en phase avec le signal d'erreur normal et qui correspond à une erreur de dérive d'environ 1° à 300 t./min, en cas d'alimentation à la fréquence du réseau. La valeur de cette erreur diminue quand la fréquence augmente, de sorte que, pour ces applications, le service à 400 Hz est plus favorable qu'à la fréquence du réseau. Aux vitesses élevées, il se produit en outre une tension déphasée de 90° et dont l'amplitude augmente rapidement, dès que la vitesse synchrone est dépassée de quelques pour cent [3].

La précision d'une chaîne de transmission synchrone avec synchro-détecteur dépend très peu des variations de la tension de service et de la fréquence d'alimentation.

La fig. 17 montre une courbe d'erreur d'une installation de transmission constituée par un transmetteur et un synchro-détecteur. L'écart maximum vers le haut est de 13 minutes d'angle et, vers le bas, de 16 minutes. La dispersion de l'erreur est donnée par la somme des écarts et est, dans le cas considéré, de 29 minutes. Cette courbe d'erreur concerne deux anciens types de synchro-machines provenant des stocks de l'armée américaine et qui avaient déjà souffert d'un stockage défectueux. Malgré cela, l'erreur totale est encore inférieure à $0,5^\circ$. Comme on le voit, l'erreur angulaire est

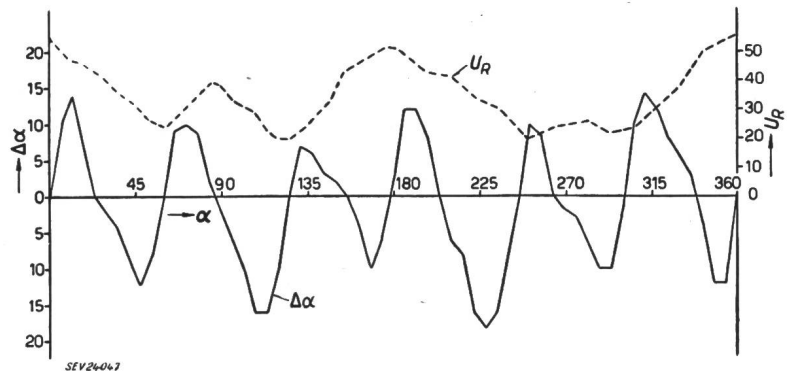
périodique, en fonction de l'harmonique d'ordre 6 de la rotation du rotor. Cette courbe d'erreur a été relevée au moyen des cercles gradués d'un tour et

généralement avant tout à la valeur maximum de l'erreur, plutôt qu'à une valeur moyenne ou probable.

Fig. 17

Erreur angulaire $\Delta\alpha$ et tension résiduelle U_R d'un récepteur de synchro-détection à la position zéro dans une liaison autosynchrone en fonction de la position du rotor du transmetteur

$\Delta\alpha$ erreur angulaire en minutes
 U_R tension résiduelle en mV



d'une fraise, ce qui permettait de lire encore avec certitude une erreur angulaire d'une minute.

La position de la ligne de zéro de la courbe d'erreur est arbitraire. On peut la déplacer jusqu'à

La dispersion d'erreur indiquée par les fabricants se rapporte, comme nous l'avons mentionné, à la comparaison avec une synchro-machine normale. La précision d'un tel appareil est de l'ordre d'une minute d'angle. La courbe d'étalonnage est souvent enregistrée automatiquement et est livrée avec la synchro-machine (fig. 18). Lorsque deux machines sont utilisées ensemble dans une installation de télémessure, les erreurs de chacune d'elles s'additionnent vectoriellement. Si l'on dispose de courbes d'étalonnage et si l'on peut choisir la paire parmi un grand nombre de machines, il est possible par une combinaison appropriée d'obtenir que les erreurs se compensent, du moins les plus grandes (paires sélectionnées). Parfois, la valeur et l'endroit de l'erreur maximum sont indiqués dans la désignation de type. Grâce à une combinaison adéquate, on peut obtenir facilement que l'erreur totale soit inférieure à $0,2^\circ$, ce qui correspond déjà à une précision de $0,055\%$, rapporté à 360° .

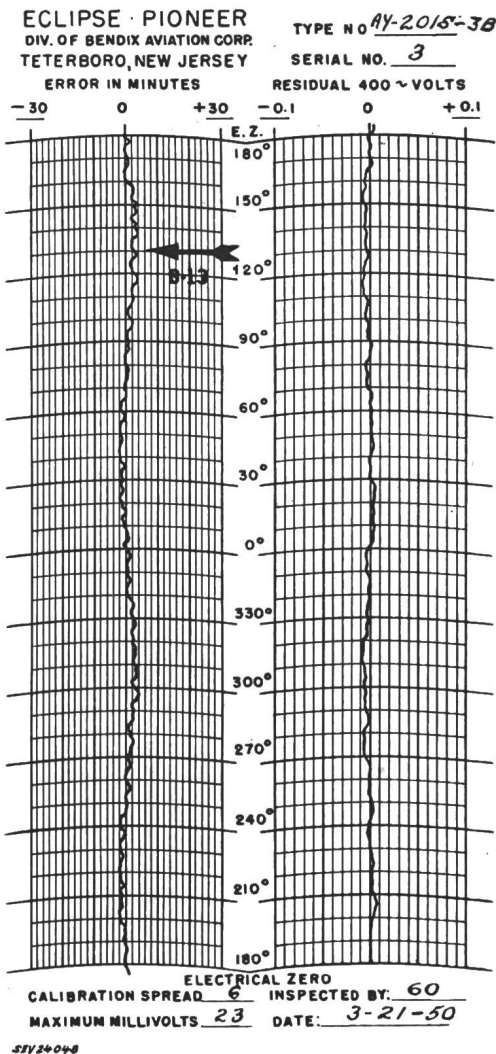


Fig. 18

Enregistrement d'une courbe d'étalonnage d'un synchro de précision

7. Exemple d'application

Nous avons mentionné diverses applications de synchro-machines à des asservissements calculateurs analogiques et appareils de télémessure. Pour terminer cet exposé, nous décrirons un appareil qui renferme un grand nombre de synchro-machines et constitue en outre un bel exemple de l'utilisation de circuit de réglage en boucle fermée dans le domaine de la métrologie.

Il s'agit d'une installation servant à mesurer la consommation de carburant de grands avions à plusieurs moteurs. Elle indique la somme des quantités de carburant fournies aux divers moteurs par unité de temps et, simultanément, la réserve de carburant par un compteur. Dans la conduite d'amenée de carburant à chacun des moteurs est monté un débitmètre où un petit clapet à ressort de rappel est dévié de sa position de repos par le flux d'essence. Ce mouvement angulaire est transmis au rotor d'un synchro-différentiel, inséré entre un transmetteur dans l'appareil indicateur et un synchro-détecteur (fig. 19 et 20). Lorsque de l'essence ne s'écoule pas, la tension de sortie du synchro-détecteur est nulle. Mais, aussitôt que le transmetteur différentiel est déplacé par le courant d'essence, il se produit dans le synchro-détecteur un

ce que la composante de courant continu de la courbe soit compensée et indiquer alors la valeur efficace de cette courbe. La détermination de cette valeur est toutefois fort longue et l'utilisateur s'intéresse

signal d'erreur et le moteur dans l'appareil indicateur commence à tourner. Sur l'arbre de ce moteur se trouve un aimant tournant dans un cylindre creux, qui est le siège de courants de Foucault et

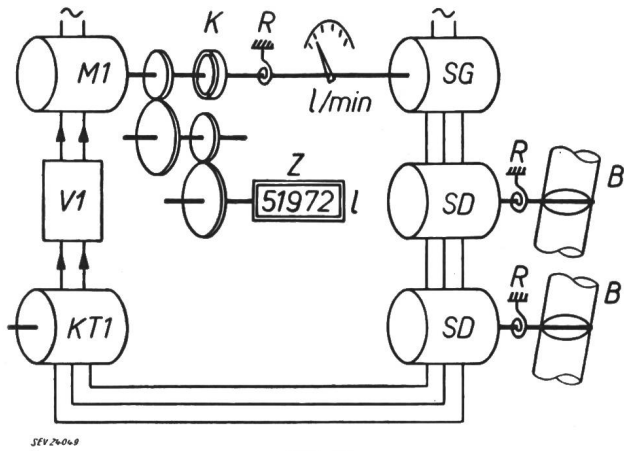


Fig. 19

Equipement de mesure de la consommation de carburant d'un avion multimoteur

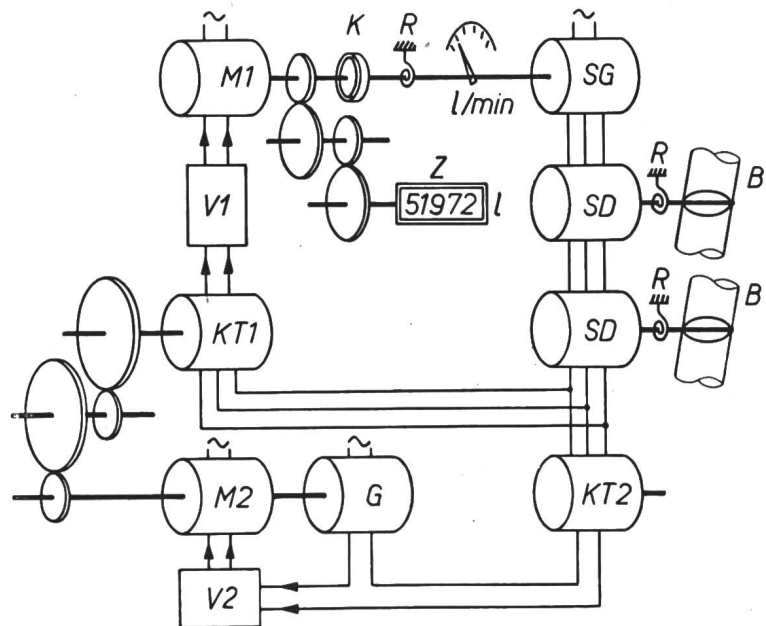
M servomoteur; K liaison magnétique à courants de Foucault; R ressort de rappel; SG transmetteur de synchro-détection; SD transmetteur différentiel; KT récepteur de synchro-détection; V amplificateur; B conduite de carburant; Z compteur indiquant la quantité de carburant consommé

commence à tourner jusqu'à ce que le couple transmis par ces courants soit équilibré par la force d'un ressort de rappel. L'aiguille de l'indicateur est solidaire de ce cylindre, qui est, d'autre part, accouplé au rotor du transmetteur. De ce fait, celui-ci est tourné dans le sens qui correspond à une compensation du déplacement du transmetteur et le signal d'erreur diminue. La vitesse du moteur diminue alors également, de même que le couple transmis par l'accouplement à courants de Foucault. On obtient finalement un état d'équilibre, pour lequel le moteur tourne avec une vitesse proportionnelle à la vitesse d'écoulement de l'essence. Le moteur entraîne un compteur qui indique la quantité de carburant consommée, par rapport à une valeur initiale. Le rotor du transmetteur, et par conséquent l'aiguille de l'indicateur, suit la position du transmetteur différentiel avec un certain écart qui donne lieu à un signal d'erreur, de sorte que le moteur tourne. L'erreur d'indication peut être compensée par un étalonnage approprié. L'ensemble se comporte comme un régula-

Fig. 21

Equipement semblable à celui de la fig. 19, disposant en plus d'une boucle auxiliaire compensant l'erreur résiduelle en régime stationnaire

G génératrice tachymétrique (pour le reste, voir la légende de la fig. 19)



SEV 24-051

teur proportionnel, car l'erreur d'indication augmente avec la grandeur à mesurer.

L'installation est sensible aux variations de tension et aux modifications du degré d'amplification de l'amplificateur V 1. Ainsi, lorsque ce degré di-

minue, le maintien de la vitesse du servomoteur exige un signal d'erreur plus grand qu'auparavant. Cette sensibilité peut être évitée, et l'erreur rémanente d'indication supprimée, lorsque le circuit

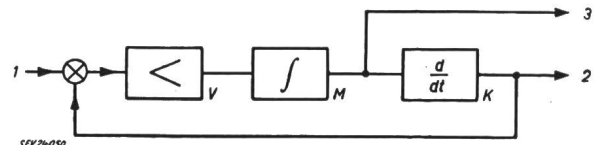


Fig. 20

Schéma de l'équipement de mesure de consommation de carburant selon fig. 19

V amplificateur; M élément intégrateur (p. ex. moteur); K élément différentiateur (liaison magnétique à courants de Foucault); 1 valeur mesurée de la vitesse de débit; 2 valeur affichée de la vitesse de débit; 3 consommation totalisée, valeur affichée par le compteur

de réglage est transformé par le montage d'un circuit auxiliaire en régulateur proportionnel-intégral (fig. 21 et 22). Le circuit auxiliaire se compose essentiellement d'un servomoteur M 2 accouplé avec un grand rapport de transmission au rotor du synchro-détecteur KT 1, ainsi que d'un autre synchro-détecteur KT 2. Sa tension de sortie est amplifiée par un amplificateur V 2 et conduite au moteur M 2. La tension de sortie du KT 2 est nulle et le moteur M 2 arrêté, lorsque la position du rotor du transmetteur dans l'appareil indicateur compense la somme des déplacements angulaires des divers transmetteurs différentiels. Le synchro-détecteur KT 1 doit en outre fournir une tension telle, que le servomoteur M 1 atteigne la vitesse nécessaire pour faire déplacer le rotor du transmetteur par l'intermédiaire de l'accouplement à courants de Foucault. Lorsque, par exemple, le degré d'amplification de V 1 diminue de ce fait, la vitesse du moteur M 1 diminue également et le

rotor du transmetteur demeure un peu en arrière de sa position de consigne. Il se produit donc au synchro-détecteur KT 2 un signal d'erreur et le servomoteur auxiliaire M 2 commence à tourner. Le rotor du synchro-détecteur KT 1 est alors dé-

Désignations en diverses langues d'éléments «synchros»

Tableau I

Français	Anglais/Américain	Allemand	Italien
Transmetteur	Transmitter Generator	Geber	Trasmittitore
Récepteur de téléaffichage	Receiver Repeater Motor	Empfänger	Ricevitore Ricevitore di coppia
Synchro-détecteur Récepteur de synchro-détection Transformateur de contrôle	Control Transformer Coincidence Transmitter	Kontrolltransformator	Trasformatore di controllo
Transmetteur différentiel	Differential Transmitter Differential Generator Follow-through-Transmitter	Differential-Geber	Trasmittitore differenziale
Récepteur différentiel	Differential Receiver Differential Motor Hunter Motor	Differential-Empfänger	Ricevitore differenziale
Déphaseur Resolver Transformateur de coordonnées Variomètre	Resolver	Resolver	Risolutore

Lorsque des confusions sont possibles, on peut faire précéder les désignations françaises, anglaises et allemandes du mot «synchro-», et les désignations italiennes du mot «sincrono-».

placé de telle sorte qu'il en résulte une tension de sortie un peu plus élevée, ce qui compense la baisse

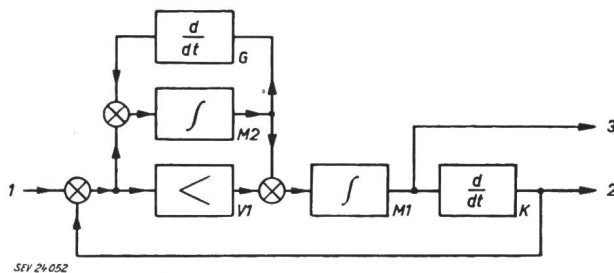


Fig. 22

Schéma de l'équipement de mesure de consommation du carburant selon fig. 21

1 valeur mesurée de la vitesse de débit; 2 valeur affichée de la vitesse de débit; 3 consommation totalisée, valeur affichée par le compteur; V1 amplificateur; M1, M2 éléments intégrateurs (moteurs); K élément différentiateur (accouplement magnétique à courants de Foucault); G génératrice tachymétrique

d'amplification. Le rapport de transmission entre M2 et K T 1 est choisi suffisamment grand pour que le système ait déjà cessé d'osciller avant que le rotor du K T 1 se soit notablement déplacé, lors

d'une modification du débit de l'essence. L'alter-nateur tachymétrique G sert à la stabilisation du circuit auxiliaire de réglage.

Appendice

Les désignations des différentes formes des appareils synchros ne sont pas encore bien normalisées. Toutefois, une normalisation est en train de s'établir, basée surtout sur les normes américaines. Le tableau I indique quelques-unes des expressions les plus fréquentes.

Bibliographie

- [1] Johnson, T. C.: Selsyn Design and Application. Electr. Engng. t. 64(1945), n° 10, p. 703...708.
- [2] Blackburn, John F.: Components Handbook. Massachusetts Institute of Technology, Radiation Laboratories Series, t. 17. New York: McGraw-Hill 1949.
- [3] Chestnut, H.: Electrical Accuracy of Selsyn Generator-Control Transformer System. Trans. AIEE t. 65(1946), n° 8/9, p. 570...576.
- [4] Umlauf, H.: Aus Theorie und Praxis der Fernübertragungssysteme für unmittelbare Winkelwertübertragung. Feinwerktechn. t. 59(1955), n° 1, p. 1...10.
- [5] Glass, J. P. et P. F. Bechberger: Precision Autosyns for Servo Systems. Aeron. Engng. Rev. t 5(1946), n° 6.
- [6] Bell, J.: Some Aspects of Electrical Computing. Electronic Engng. t. 23(1951), n° 280, p. 213...216, et n° 281, p. 264...269.

Adresse de l'auteur:

M. Müller, Dr sc. techn., Balgriststrasse 106, Zurich 8/32.

Die Anwendung elektronischer und magnetischer Verstärker für die Steuerung von Antrieben

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 10. November 1955 in Olten, von W. Güttinger, St. Gallen

621.375.2 + 621.375.3 : 621.34.07

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einer kurzen Zusammenstellung der Eigenschaften elektronischer und magnetischer Verstärker, soweit sie das Verhalten des geschlossenen Regelsystems beeinflussen.

Bref aperçu des propriétés d'amplificateurs électroniques et magnétiques, en ce qui concerne le comportement du système de réglage en circuit fermé.

Will man irgend eine charakteristische Grösse einer Maschine, wie Drehzahl, Drehmoment, Leistung usw. steuern, so stehen prinzipiell zwei Möglichkeiten offen:

a) Die offene Regelung, bei welcher die Energiezufuhr oder ganz allgemein eine Eingangsgrösse variiert wird, um eine gewisse Ausgangsgrösse zu beeinflussen. Da die Ausgangsgrösse aber nicht stets eine absolut eindeutige Funktion der Eingangsgrösse ist, so ist die offene Regelung oft nicht