

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 69 (1978)

Heft: 12

Artikel: Le capteur accélérométrique

Autor: Vilaclara, G. / Pernegr, J. / Tende-Lembe, D.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-914909>

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: 16.03.2025

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

- [13] H.R. Trimmel and W.E. Heinlein: Fully floating chain-type gyrator circuit using operational transconductance amplifiers. IEEE Trans. CT 18(1971)6, p. 719...721.
- [14] A. Antoniou: Realisation of gyrators using operational amplifiers, and their use in RC-active-network synthesis. Proc. IEE 116(1969)11, p. 1838...1850.
- [15] H.J. Orchard and D.F. Sheahan: Inductorless bandpass filters. IEEE J. Solid-State Circuits 5(1970)3, p. 108...118.
- [16] J. Gorski-Popiel: RC-active synthesis using positive-immittance convertors. Electronics Letters 3(1967)8, p. 381...382.
- [17] R.H.S. Riordan: Simulated inductors using differential amplifiers. Electronics Letters 3(1967)2, p. 50...51.
- [18] L.T. Bruton: Network transfer functions using the concept of frequency-dependent negative resistance. IEEE Trans. CT 16(1969)3, p. 406...408.
- [19] N.C. Bui and L.T. Huynh: Réalisation de FDNR et FDNC avec des convertisseurs de courant. Communication du Groupement pour l'Etude des Télécommunications de la Fondation Hasler Berne (AGEN) –(1976)20, p. 29...38.

Adresse des auteurs

L.T. Huynh, Laboratoire d'électronique générale, M. Hasler et D. Dubois, Chaire de la théorie des circuits et des systèmes, EPFL, Chemin de Bellerive 16, 1007 Lausanne.

Le capteur accélérométrique

Par G. Vilaclara, J. Pernegr, D. Tende-Lembe et P. Veuve

531.768 : 621.317.39;

Le capteur accélérométrique est utilisé pour détecter des vibrations ou accélérations. Il en existe plusieurs types: l'accéléromètre piézoélectrique (le plus répandu), à jauge de contrainte, piézorésistif et le servo-accéléromètre (très sensible). Les principales caractéristiques d'un accéléromètre sont sa sensibilité et sa bande de fréquence. Elles déterminent son domaine d'utilisation et ses applications.

Beschleunigungsaufnehmer werden zum Nachweis von Schwingungen oder Beschleunigungen verwendet. Man unterscheidet den piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer (am meisten verbreitet), den Aufnehmer nach dem Dehnungsmeßstreifenprinzip, den piezoresistiven Aufnehmer sowie den sehr empfindlichen Servo-Beschleunigungsaufnehmer. Die wichtigsten Merkmale sind die Empfindlichkeit und der Frequenzbereich. Diese bestimmen die Verwendungsmöglichkeiten und die Anwendungen.

Le texte qui suit est un exemple de travail d'étudiants de la section d'électricité. Il a été rédigé et présenté oralement dans un séminaire organisé dans le cadre du cours d'électrotechnique du 1^{er} semestre. Le but de tels séminaires est de stimuler la participation directe des étudiants en les entraînant à effectuer une étude personnelle sur un sujet approprié (description de dispositifs électriques ou électroniques, applications techniques de l'électricité).

Ce travail implique la recherche d'une documentation adéquate, la rédaction d'un texte de quelques pages, dans un style de vulgarisation scientifique et une courte présentation orale et bien illustrée devant un auditoire d'étudiants et d'enseignants. Prof. F. de Coulon

1. Introduction

Des vibrations mécaniques apparaissent dans toutes les machines et dans tous les mécanismes. En général, elles ont une influence nuisible, c'est pourquoi on cherche à les diminuer au maximum; il faut donc, en premier lieu, les mesurer.

L'appareil le plus répandu permettant de détecter des vibrations est le capteur accélérométrique. Il en existe différents types, le plus utilisé étant l'accéléromètre piézoélectrique, dont on exposera le principe de fonctionnement et certaines applications. Les autres types, moins courants, seront traités plus brièvement.

Chaque accéléromètre est constitué d'une masse sismique m opposant son inertie à toute accélération. Cette masse est reliée à la structure subissant l'accélération par un système élastique (de raideur k). Dans le cas de la figure 1, c'est un ressort dont on peut mesurer la déformation.

2. L'accéléromètre piézoélectrique [1] ¹⁾

Cet accéléromètre a de nombreux avantages: il n'a pas besoin d'alimentation (auto-générateur), est relativement robuste et compact, permet de mesurer sur une large bande de fréquences, est bon marché, facile à calibrer, peu sensible aux variations du milieu (température, excitation acoustique, champs magnétiques, radiations) ainsi que de faible poids et de dimensions réduites (peu d'influence sur la structure à mesurer).

Un accéléromètre piézoélectrique (fig. 2) est un transducteur électromécanique qui donne, à sa sortie, un signal élec-

trique proportionnel à l'accélération à laquelle il a été soumis. L'élément piézoélectrique produit un signal électrique proportionnel (dans une certaine gamme de fréquences) à la déformation que lui fait subir une force F , développée par la masse sismique. Cet élément peut être déformé de plusieurs manières: par cisaillement, par compression, par traction, correspondant à des constructions d'accéléromètres différentes, la compression étant la plus fréquemment utilisée (fig. 3).

Lorsque le capteur piézoélectrique est soumis à une accélération, la masse m fait subir une force F à l'élément piézoélectrique, qui se déforme (variation d'épaisseur), générant des charges à ses bornes. On peut mesurer soit la charge, soit la différence de potentiel et en déduire directement l'accélération.

La matière piézoélectrique est une matière générant des charges électriques lorsqu'elle est sollicitée mécaniquement. C'est une propriété naturelle de certaines matières telles que le sel de Rochelle et le quartz. Ces cristaux naturels sont maintenant remplacés par des céramiques ferroélectriques polarisées dont le principal avantage est que leurs propriétés piézoélectriques (sensibilité) et mécaniques peuvent être contrôlées et modifiées durant la fabrication par de petits changements de leur composition.

Les propriétés importantes des matières piézoélectriques pour l'utilisation dans la construction d'accéléromètres sont les suivantes:

- La constante piézoélectrique d , (équivalente de sensibilité) exprime la charge générée q par unité de force appliquée $d = q/F$.
- La constante d'élasticité k . L'élément piézoélectrique se comportant comme un ressort, k fixe la fréquence de résonance de l'accéléromètre.
- La constante diélectrique ϵ détermine la capacité interne. Plus cette capacité est grande, plus la limite inférieure de fréquence de l'accéléromètre est basse. Celle-ci doit évidemment être la plus basse possible, car la gamme de fréquences de l'accéléromètre s'en trouve élargie.
- La résistance interne doit être aussi grande que possible: diminution de perte de charge, extension de la gamme de fréquences.
- Le point Curie est la température à laquelle les propriétés piézoélectriques des cristaux artificiels vont être modifiées ou perdues. Il se situe entre 120 °C et plus de 500 °C suivant les matières; pour le quartz, il est de 300 °C.

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

3. Autres types d'accéléromètres

L'accéléromètre à jauge de contraintes est un accéléromètre nécessitant une alimentation. Son principe de fonctionnement est basé sur la variation de résistance d'un fil dont la longueur varie proportionnellement à la force qu'on lui applique (on parle aussi d'extensomètre à fil résistant). On impose une différence de potentiel constante aux bornes du fil. Grâce à un ampèremètre, on relèvera des variations de courant proportionnelles à la résistance.

Le principe de fonctionnement de l'accéléromètre piézo-résistif est semblable à celui de l'accéléromètre à jauge de contraintes: le fil résistant utilisé dans celui-ci est remplacé par un semiconducteur dont la résistance varie avec l'effort mécanique. L'avantage de cet accéléromètre est sa grande sensibilité, environ 100 fois supérieure à celle de l'accéléromètre à jauge de contraintes.

Le servo-accéléromètre (fig. 4) permet de mesurer des fréquences très basses. Lorsque la masse subit une accélération, le capteur, ayant décelé un déplacement, envoie un signal au servo-amplificateur qui, à son tour, envoie un courant dans la bobine, pour ramener la masse dans sa position d'équilibre. On mesure aux bornes d'une résistance calibrée une tension proportionnelle à ce courant.

Cet appareil est auto-amortisseur de par sa conception: la masse étant ramenée dans sa position de départ, l'énergie de l'élément élastique est annulée et ne perturbe pas la mesure. Cet accéléromètre est très sensible et très précis; il permet de mesurer des accélérations de l'ordre de μg à des fréquences de 1 à 2 Hz.

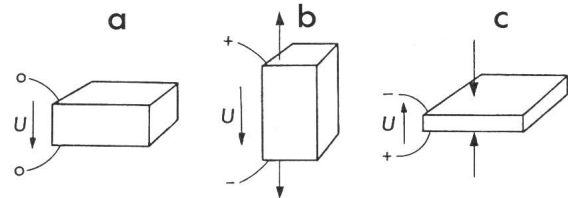


Fig. 3 Illustration de la compression d'un élément piézoélectrique
 a pas de déformation, tension nulle
 b traction $U \neq 0$
 c compression $U \neq 0$

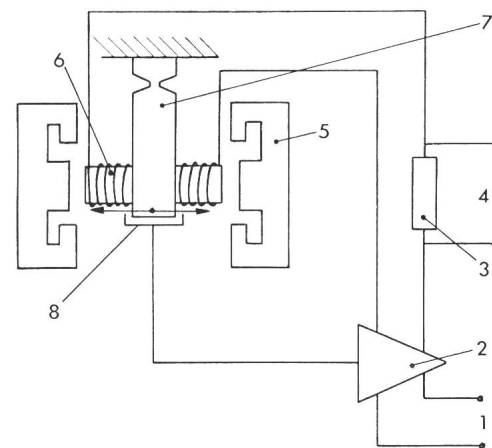


Fig. 4 Schéma d'un servo-accéléromètre
 1 alimentation
 2 servo-amplificateur
 3 résistance calibrée
 4 signal
 5 aimant permanent
 6 masse
 7 élément élastique
 8 capteur de déplacement (capacitif)

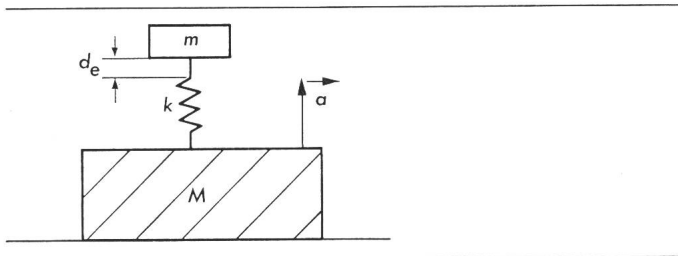


Fig. 1 Schéma de principe d'un accéléromètre

- a accélération
- d_e déformation
- k constante d'élasticité du ressort
- M base
- m masse sismique

Pour avoir une meilleure réponse sur la gamme de fréquences, le signal issu de l'élément piézoélectrique doit passer par un préamplificateur, qui sera soit placé à une certaine distance de l'accéléromètre, soit incorporé à ce dernier.

La sensibilité exprime le rapport entre le signal électrique de sortie et l'accélération. Ce rapport est exprimé en tension par unité d'accélération (mV/g) ou en charge par unité d'accélération (pC/g), suivant le préamplificateur utilisé ($1 g = 9,81 m/s^2$). Il est à noter que plusieurs facteurs sont à considérer lorsque l'on parle de sensibilité. Il s'agit de la résistance interne de l'accéléromètre (très élevée, donc négligeable), de la capacité de l'accéléromètre, de la capacité du câble et de sa résistance de fuite, de la capacité d'entrée du préamplificateur et de la résistance d'entrée du préamplificateur.

La gamme de fréquences de l'accéléromètre est déterminée par de nombreux facteurs; on se limitera à citer les suivants:

- Le rapport entre la masse sismique mobile m et celle de la base fixe M (fig. 1).
- La raideur du système élastique (fig. 1). La masse et la raideur définissent la fréquence de résonance du système accélérométrique qui fixe la limite supérieure de fréquence.
- La réponse en fréquence dépend du préamplificateur utilisé, de la sensibilité de l'accéléromètre au changement brusque de température et du niveau de bruit du système de mesure (bruit dû en général au préamplificateur).
- La réponse en haute fréquence est fonction des caractéristiques de l'accéléromètre et de la linéarité de l'élément piézoélectrique qui, à fréquence élevée, a tendance à devenir non linéaire.

Pour réduire les erreurs de mesure au maximum, il faut que le montage de l'accéléromètre soit correctement réalisé. Il faut en outre tenir compte de l'étanchéité du système (humidité) et prévoir un système de refroidissement (à eau ou par air pulsé) si nécessaire. Les autres facteurs d'erreurs sont les déformations de la base, les effets acoustiques et la propreté des contacts.

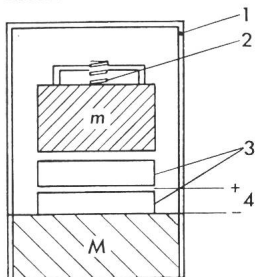


Fig. 2 Schéma d'un capteur piézoélectrique
 1 boîtier
 2 ressort de précontrainte
 3 éléments piézoélectriques
 4 sortie

L'accéléromètre *multiaxial* permet de détecter des accélérations dans plusieurs directions. L'accéléromètre *triaxial*, p. ex., permet de détecter une accélération quelconque selon ses 3 composantes; il se compose de trois accéléromètres simples.

4. Applications

On peut classer les capteurs accélérométriques suivant l'utilisation qu'on en fait [2]. Il existe des capteurs pour les accélérations de mouvements linéaires, pour les accélérations angulaires et pour la mesure de l'accélération de gravité. Le principe fondamental de la mesure est le même dans les différents types.

Le capteur à *accélérations de mouvements* est utilisé p. ex. sur les véhicules et dans les avions. L'accélération maximale tolérée est signalée par un élément masse-ressort capable de fermer un circuit électrique pour une valeur déterminée. Pour des accélérations à basse fréquence, on peut utiliser des accéléromètres comportant une amplification mécanique des déformations du ressort.

Pour déterminer l'*accélération angulaire*, une masse à symétrie cylindrique (p. ex. un disque) est montée de manière à pouvoir tourner autour de son axe. Son déplacement angulaire est contrarié par un ressort; il est proportionnel à l'accélération angulaire et peut être mesuré. Ce dispositif est utilisé sur les éléments en rotation d'une machine pour contrôler les accélérations angulaires afin d'éviter qu'ils ne soient soumis à une trop

grande force d'inertie qui pourrait en entraîner la rupture ou la déformation.

Le *gravimètre* est un instrument qui permet de mesurer les variations de l'accélération de gravité. On l'emploie souvent dans les recherches géophysiques du sous-sol. Les gravimètres sont fréquemment utilisés en mer ou en avion. Ce sont des accéléromètres différents de ceux décrits; ils sont montés avec une suspension à un cardan ou sur une plate-forme stabilisatrice qui élimine les accélérations considérables dues aux oscillations du mobile. L'enregistrement des mesures est automatique et continu.

Certains systèmes de haut-parleurs sont munis d'un accéléromètre piézoélectrique fixé sur la calotte de la membrane. Ce capteur mesure l'accélération de la membrane du haut-parleur. L'information reçue par le capteur est comparée avec le signal de sortie de l'amplificateur. Un dispositif correcteur envoie à la membrane une impulsion pour que les signaux d'entrée et de sortie du haut-parleur correspondent.

Bibliographie

- [1] Accelometers, instructions and applications. Nærum, Bruel und Kjaer, 1975; p. 1...75.
- [2] Encyclopédie internationale des sciences et des techniques. Paris, Larousse, 1969.

Adresse des auteurs

G. Vilaclara, J. Pernegr, D. Tende-Lembe et P. Veuve, étudiants à l'EPFL, Département d'électricité, 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.

Les problèmes de la commande optimale de réseaux électriques

Par A. Roch et J. Simonett

1. Introduction

Les problèmes de la production d'énergie se posent à trois niveaux dont l'ordre de priorité est bien déterminé: au premier niveau se situent les problèmes de *sécurité* de l'exploitation, puis viennent les considérations de *qualité* (fréquence-puissance), et finalement l'aspect *économique* de la production. Un calcul de répartition optimale de la production ne doit donc jamais mettre en question la sécurité du réseau et diminuer la qualité de l'énergie produite.

D'autres contraintes qualitatives et quantitatives peuvent apparaître dans un tel problème, qui limitent la liberté de résolution de la commande optimale. Nous avons rencontré entre autres les exemples suivants:

- le maintien d'un débit minimum d'un cours d'eau,
- la capacité maximale des conduites, des lignes électriques,
- les relations entre les débits respectifs de centrales au fil de l'eau,
- les temps de démarrage des centrales, en particulier thermiques.

Enfin, l'optimisation du rendement économique est spécifique à chaque réseau et provient le plus souvent d'un caractère de production mixte qu'il s'agit de programmer au mieux des intérêts de l'exploitant, dans le cadre des contraintes à respecter.

Dans son programme d'applications industrielles, l'Institut de réglage automatique a eu l'occasion de résoudre le problème de l'optimisation de la commande de réseaux électriques dans les deux cas suivants:

Il s'agissait d'abord de la commande d'un grand réseau nord-américain, comprenant des centrales thermiques et des centrales hydrauliques; ces dernières étaient pour la plupart

621.311.1: 621.316.71;
au fil de l'eau, et fonctionnaient en cascade. Les centrales thermiques utilisaient du combustible importé, relativement coûteux. Aucune centrale nucléaire n'était connectée.

Le deuxième exemple a été celui d'un réseau régional suisse, dont le caractère mixte provenait d'une production propre partielle (sous forme hydraulique: accumulation et fil de l'eau), et de l'achat (sous contrat énergie-puissance) à un tiers, à un tarif variable selon l'heure et la saison. De plus, il fallait compter avec des pénalisations importantes en cas de dépassement des puissances souscrites.

Les conditions assez dissemblables de ces deux cas concrets nous ont permis d'étudier l'importance d'éléments tels que

- l'influence des pertes en lignes
- les variations de rendement des centrales hydro-électriques
- les conditions de sécurité en réseau isolé et interconnecté
- les données hydrologiques, et la prévision des débits disponibles
- le coût des démarrages et arrêts de groupes et de centrales.

2. Formulation mathématique du problème d'optimisation

Pour la clarté de l'exposé, nous nous limiterons ici à présenter le problème d'un réseau de distribution d'énergie répondant à la demande des consommateurs, ce réseau produisant une partie de son énergie, le solde étant acheté à un fournisseur central.

Les méthodes de calcul d'optimisation demandent la formulation d'un *modèle*, c'est-à-dire une description mathématique du système [1; 2]¹⁾. Le modèle n'est en général pas unique,

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