

Connaissances de base pour l'analyse vibratoire. Guide du débutant.



Radek Sglunda
Adéla Štefková
Radim Langer



Liste des abréviations

- AVG – Valeur moyenne
- RMS – Valeur efficace
- RPM – Tour par minute
- * symbole pour multiplication
- μm – micromètre
- disp. = déplacement
- vel. = vitesse
- acc. = accélération

Contenu

Il n'y a pas à avoir peur.....	3
Un peu d'histoire sur le management en maintenance.....	3
Mesure	4
Evaluation des valeurs de mesure	4
L'utilisation des standards.....	4
Quoi faire sans standards?	5
Quels taux de réussite pour les diagnostics?	5
Signal temporel	6
Amplitude de vibration.....	7
Numérisation de signal	7
Fréquence d'échantillonnage	8
AVG – Valeur moyenne.....	8
La valeur moyenne vue autrement.....	9
Influence de l'allure du signal sur la valeur moyenne.....	10
Valeur RMS.....	11
Un peu de math	12
Indépendance de la longueur du signal	12
Qu'est ce que la fréquence?	13
Fréquence de la vitesse machine	14
Capteur de vibration.....	14
Analogie avec les réseaux électriques	15
Fréquences vibratoires et que faire avec?.....	15
Unités SI.....	17
Mesure de déplacement.....	17
Mesure de vitesse	18
Mesure d'accélération	19
La machine est une masse sur ressorts.....	22
Période et phase	22
Détection et analyse	24
Mesure globale	24
Types de capteur.....	24

Montage du capteur sur la machine	25
Où mesurer la vibration sur la machine?.....	26
Mesure de la vitesse	26
Quelles valeurs mesurer à l'origine?	27
Quels sont les défauts vibratoires classiques?.....	27
Comment évaluer les valeurs de mesure?	28
Diagnostiques performants même avec un vibromètre	29
Qu'est ce que la résonance?.....	30
Déséquilibre électrique	32
Comment pratiquer les mesures?	34
Rapports de mesure	35
Organisation et évaluation de mesure	35
Calibration	36
Signal temporel et spectre	37
Diagnostic avancé d'état de roulement (analyse d'enveloppe).....	40
Ecouter les vibrations	44
Ultrasons	44
Re-calcul de l'accélération, de la vitesse et du déplacement	44
Pourquoi mesurer les basses fréquences en déplacement et les hautes fréquences en accélération?.....	45
Mesures ONLINE	46
Equilibrage.....	47
Réglages des paramètres basiques.....	48
Réglages du capteur.....	48
Réglages des valeurs globales (niveau 1)	48
Réglages mesure signal temporel	49
Réglage mesure spectre FFT	49
Réglage démodulation spectrale FFT	50
Que dire pour conclure?	51

Il n'y a pas à avoir peur

Si vous devez mettre en œuvre et réaliser des diagnostics vibratoires dans votre entreprise, pas de panique. Ce domaine propose des procédures et méthodes simples et complexes. Vous commencerez par les plus simples, puis progresserez progressivement vers des méthodes plus complexes. Au début, vous effectuerez des mesures très similaires à celles effectuées avec un voltmètre. À la différence près que vous ne mesurerez ni la tension, ni le courant, ni la résistance, mais les vibrations.

L'objectif principal du diagnostic est de prévenir les pannes imprévues car éliminer leurs conséquences entraîne des réductions de coûts. Si un roulement tombe en panne de manière inattendue, les autres composants de la machine environnante seront également endommagés. C'est pourquoi sa réparation est très coûteuse.

Le diagnostic vous avertit à l'avance de la dégradation de l'état du roulement, vous permet de planifier son remplacement lors d'un arrêt régulier et les coûts seront considérablement réduits. L'objectif du diagnostic est donc de réduire les coûts de maintenance (augmenter le MTBF).

Un peu d'histoire sur le management en maintenance

Autrefois, les machines fonctionnaient jusqu'à tomber en panne. Elles étaient alors réparées (curatif). Cette approche présentait deux inconvénients majeurs. Prenons un problème relativement mineur, par exemple l'usure d'un roulement. Le remplacement du roulement était simple et rapide. Cependant, si l'usure est importante, le roulement se casse et le rotor s'arrête de tourner. Le rotor pèse plusieurs centaines de kilogrammes et ne s'arrête pas facilement. L'inertie importante peut détruire la machine en quelques secondes. La réparation est alors longue et coûteuse.

Un autre inconvénient est l'arrêt brutal de la ligne de production, dû à l'usure d'un seul roulement. Par exemple, la ligne fabrique des produits d'une valeur d'un million d'euro en une heure. Si la réparation dure plusieurs heures, la perte se chiffre en plusieurs millions.

Le développement ultérieur du système de maintenance a ensuite conduit au remplacement préventif. Chaque composant usé était remplacé à intervalles réguliers. Voici les principaux inconvénients : Les coûts de maintenance sont élevés, car un composant est remplacé en permanence. Deuxièmement, dans la plupart des cas, le remplacement est inutile, car le composant est encore en bon état. Troisièmement, chaque intervention de maintenance n'est pas parfaite. Par exemple, l'installation d'un nouveau roulement peut être mal réalisée et son état se détériore rapidement, entraînant de toute façon une panne inattendue.

Par la suite, un autre système de maintenance est apparu : la maintenance prévisionnelle. L'état et l'usure de la machine sont mesurés régulièrement et si la situation se dégrade, une intervention de maintenance est obligatoire uniquement lorsque cela est réellement nécessaire.

Mais quelles méthodes utiliser pour mesurer l'état d'une machine ?

Le diagnostic vibratoire joue un rôle essentiel dans la mesure de l'état de santé d'une machine. Il permet de mesurer avec précision la gravité de toutes les défaillances courantes. Dans les chapitres suivants, nous expliquerons tout ce qui est nécessaire à son utilisation. Nous n'entrerons pas dans les détails théoriques ni dans les formules mathématiques. Cela n'est pas nécessaire à la mise en œuvre réussie des mesures vibratoires et à l'évaluation ultérieure de l'état de la machine.

Auparavant, on testait les vibrations acceptables en plaçant une pièce de monnaie sur une machine. En cas de chute, les vibrations étaient considérées comme élevées.

Il existe de nombreuses autres méthodes pour mesurer l'état d'une machine, mais elles sont très spécialisées et très ciblées. Aucune d'entre elles n'atteint les performances d'un diagnostic vibratoire.

Mesure

De quoi aurons-nous besoin ? Tout d'abord, d'un appareil de mesure appelé analyseur de vibrations, d'un capteur de vibrations et d'un câble pour le connecter à l'appareil. Ainsi équipés, nous nous rendons sur les machines, nous appelons cela une « ronde ». Nous effectuons des mesures sur chaque machine qui sont enregistrées dans la mémoire de l'appareil. Au retour de la ronde, nous transférons les données mesurées vers un ordinateur et les analysons.

Pour réaliser le diagnostic vibratoire, nous utilisons un programme fourni par le fabricant de l'analyseur de vibrations. Nous créons une liste de machines et y enregistrons les données mesurées.

Nous nous rendons sur la ronde à intervalles réguliers, le plus souvent possible. Bien sûr, nous ne pouvons pas y aller tous les jours. L'intervalle optimal est mensuel. Si le fonctionnement de certaines machines est critique à l'ensemble de l'usine, il est préférable d'utiliser des systèmes en ligne qui mesurent en permanence.

Evaluation des valeurs de mesure

Maintenant que les données sont enregistrées dans l'ordinateur, il faut les évaluer. Cela implique de déterminer l'état actuel des machines et si nécessaire, de planifier des réparations ou des ajustements. Comment procéder ? Il existe plusieurs façons d'analyser les valeurs mesurées.

L'utilisation des standards

Si une norme existe, elle peut être utilisée. Elle indique les valeurs limites de vibrations, généralement les limites d'avertissement et de danger. Si la limite d'avertissement est dépassée, la machine peut encore être utilisée, mais une intervention

de maintenance doit être planifiée au plus vite. Le dépassement de la limite de danger implique l'arrêt immédiat de la machine et sa réparation. La norme de base est la norme ISO 20816.

Que faire sans standards?

D'autres procédures sont alors nécessaires.

Si nous disposons de plusieurs machines identiques ou similaires, nous pouvons comparer leurs valeurs. Si les vibrations de cinq des six machines identiques atteignent 2 et celles de la sixième 8, il est clair qu'il y a un problème sur cette dernière.

Une autre option consiste à analyser la tendance d'évolution des vibrations. Si la tendance est stable sur le long terme, l'état de fonctionnement est également stable. Cela signifie que les roulements sont en bon état, que le balourd est acceptable, etc. Si les vibrations augmentent, cela signifie que les dommages augmentent et que la machine doit être réparée ou réglée.

L'analyse de la tendance ou la comparaison avec les valeurs passées est le meilleur moyen d'évaluer l'état de la machine. Une légère augmentation indique que la détérioration est faible et que nous avons suffisamment de temps pour planifier une intervention de maintenance.

Quels taux de réussite pour les diagnostics?

C'est comparable à la prise en charge de la santé humaine. Les contrôles préventifs réguliers sont comme des rondes de mesure. Les résultats des contrôles sont excellents, ce qui signifie que nous sommes en parfaite santé. Et pourtant, soudain, un problème de santé non détecté apparaît.

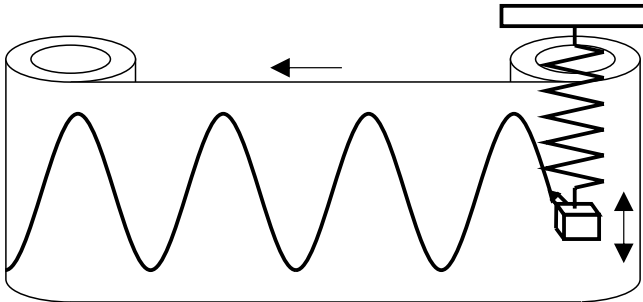
Il en va de même pour le diagnostic des vibrations. Il n'est jamais efficace à 100 %. Parfois, le défaut est trop caché à l'intérieur de la machine et difficile à identifier dans les vibrations. Ou bien, son évolution a été très rapide et lors du dernier parcours, tout était encore normal.

Il peut également arriver que les valeurs mesurées ne nous paraissent pas encore trop élevées et que nous continuions à utiliser la machine. Soudain, une panne inattendue survient. Les seuils d'avertissement et de danger doivent alors être abaissés. Ainsi, même une panne inattendue peut avoir une incidence positive pour l'avenir.

Le diagnostic des vibrations est absolument essentiel pour surveiller l'état des machines. Aucun autre type de diagnostic ne permet de détecter un éventail aussi large de défauts et d'usures.

Signal temporel

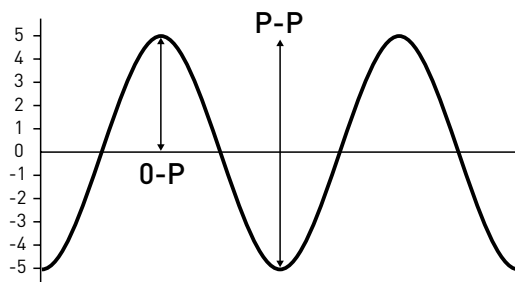
Les vibrations sont les mouvements oscillatoires répétés d'une masse entre deux positions extrêmes. Cette définition est claire. L'important est de savoir si l'amplitude des vibrations (c'est-à-dire la distance entre les positions extrêmes) est acceptable pour le fonctionnement de la machine ou pas. La vitesse du mouvement oscillatoire est également importante.



Un ressort et une masse suspendue constituent un bon exemple pour comprendre les vibrations et leurs propriétés. Si l'on étire puis relâche le ressort, la masse commence à osciller de haut en bas. L'oscillation diminue sous l'effet de la résistance de l'air et du frottement interne du ressort jusqu'à son arrêt complet. Imaginons que ces influences n'existent pas et que l'oscillation ne diminue pas. On peut fixer un stylo sur la masse et placer une bande de papier derrière. On étire puis relâche le ressort, tout en déplaçant la bande de papier vers la gauche. Le stylo trace une courbe. Cette courbe des vibrations est une forme de base et correspond mathématiquement à la fonction sinus. Nous appellerons l'enregistrement sur papier un signal temporel de vibrations et nous pourrions en évaluer d'autres paramètres utiles de vibration.

Amplitude de vibration

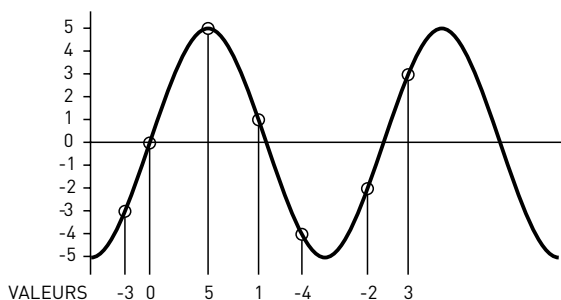
L'amplitude de la vibration peut être facilement mesurée à l'aide de l'amplitude 0-P. Appelée valeur de crête (peak), elle correspond à la distance entre la valeur moyenne du signal (correspondant à la position de repos du poids) et la valeur maximale. Sur la figure, l'amplitude 0-P est égale au nombre 5.



Par souci d'exhaustivité, mentionnons la valeur P-P (Crête-Crête), qui correspond à la distance entre les valeurs maximale et minimale. Pour un signal symétrique, la valeur P-P est le double de la valeur 0-P. Cependant, de nombreux signaux sont asymétriques et cette relation est fausse.

Numérisation de signal

La numérisation consiste à convertir un signal analogique en nombres. L'image montre un exemple de quelques valeurs lues à partir du signal. Nous sélectionnons un instant temporel et lisons sa valeur. Nous l'appellerons l'échantillon à l'instant défini. Ceci n'est qu'un exemple de lecture.



Echantillonnage de fréquence

Tout d'abord, nous devons lire des valeurs à intervalles réguliers (égaux). Par exemple, l'intervalle entre les lectures sera de 1 ms (1 ms = 0,001 s). Si la durée du signal est par exemple de 1 s, nous obtiendrons 1 000 échantillons, soit une série de 1 000 nombres. À l'avenir, nous appellerons toujours échantillons les lectures individuelles d'un signal temporel. Si nous disposons de suffisamment d'échantillons, nous pourrons leur appliquer diverses formules mathématiques et calculer divers autres résultats.

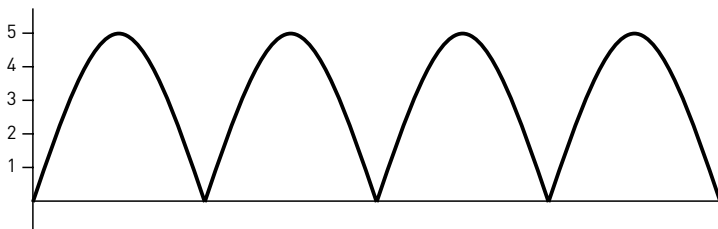
AVG – valeur moyenne

Jusqu'à présent, nous pouvons mesurer l'amplitude du signal temporel sous forme de valeurs 0-P ou P-P. L'amplitude du signal temporel peut également être mesurée comme la valeur moyenne de tous les échantillons mesurés. La valeur moyenne est calculée comme la somme des valeurs de tous les échantillons, divisée par leur nombre. C'est l'équivalent du poids moyen d'une pomme dans un panier. On additionne le poids de toutes les pommes et on divise la somme par leur nombre.

Nous allons maintenant essayer d'additionner toutes les valeurs des échantillons dans le signal temporel et de diviser par ce nombre. Mais cela n'est pas utile. Le signal sinusoïdal est symétrique par rapport à zéro, la valeur moyenne sera donc nulle. Il faut procéder différemment.

La solution consiste à convertir la forme d'onde du signal uniquement en moitié positive. Nous y parviendrons en travaillant avec les valeurs absolues des échantillons. Cela convertit les valeurs négatives en valeurs positives, par exemple la valeur absolue de -3 est +3. La valeur absolue de +3 reste +3, rien ne change.

La nouvelle forme du signal est visible sur l'image.



Si nous calculons la valeur moyenne AVG du signal à partir de la figure ci-dessus, nous obtenons 3,2. Pour la fonction sinusoïdale, la valeur moyenne AVG est toujours égale à 0,64 multiplié par la valeur 0-P. Dans l'image, 0-P est égal à 5 et la moyenne est de $0,64 \times 5 = 3,2$.

!!! Attention ! Cette conversion ne doit pas être appliquée aux signaux qui n'ont pas la forme d'une fonction sinusoïdale.

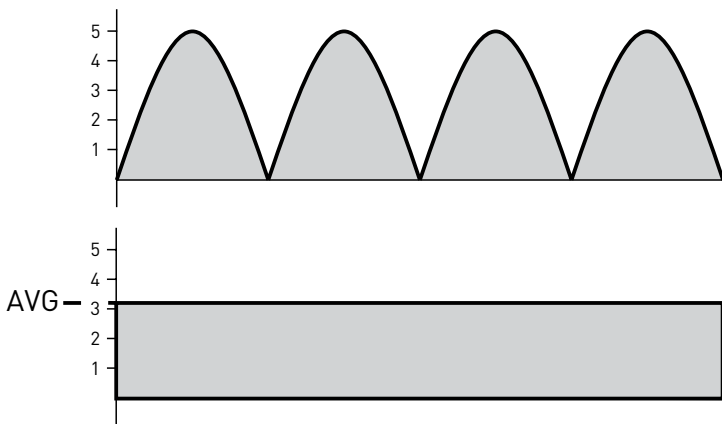
Pour les lecteurs curieux, nous présentons également la formule mathématique d'une forme d'onde continue, que nous noterons $f(x)$.

$$\text{Alors } \text{AVG} = \frac{\int_0^T f(x) dx}{T}$$

$$\text{Alors Dans notre cas, lorsque } f(x) = |\sin(x)| \text{ alors } \text{AVG} = \frac{\int_0^T |\sin(x)| dx}{T}$$

La valeur moyenne vue autrement.

Complétons et mesurons l'aire sous la fonction sinus. Mathématiquement, il s'agit du calcul d'une intégrale définie, comme mentionné précédemment. Nous allons maintenant dessiner un signal dont tous les échantillons ont la même valeur. L'aire sous le signal est calculée en multipliant la longueur par la valeur de cet échantillon. Il s'agit de l'aire du rectangle. Notre objectif est de trouver une valeur telle que les aires des deux signaux soient identiques.



Cette valeur souhaitée sera égale à 3,2 ($0,64 * 5$). Je tiens à vous rappeler que cette conversion n'est pas valable pour les signaux qui n'ont pas la forme d'une fonction sinus.

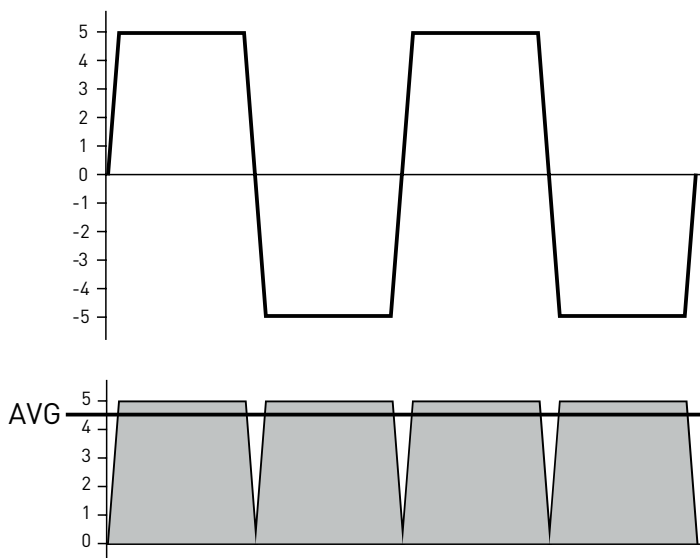
Reprenons l'exemple des pommes. Par exemple, nous en avons 20 de poids différents, dont le poids total est de 4 kg. Le poids moyen est de $4 \text{ kg} / 20 = 200 \text{ g}$. Si nous prenons 20 pommes, chacune d'un poids moyen de 200 g, elles pèseront également 4 kg. Cette approche revient à remplacer la forme d'onde sinusoïdale (irrégulière) par un signal dont toutes les amplitudes sont égales à la valeur moyenne. Il s'agit donc d'une ligne droite.

Influence de l'allure du signal sur la valeur moyenne

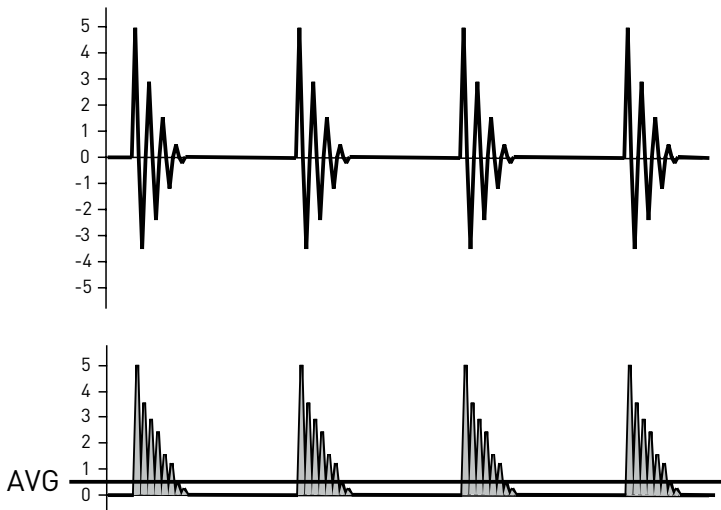
Nous allons l'expliquer à l'aide des exemples suivants.

Nous avons déjà décrit le cas d'une forme d'onde sinusoïdale. La valeur moyenne est égale à la valeur 0-P multipliée par 0,64.

Lorsque nous calculons la valeur moyenne à partir d'une forme d'onde rectangulaire, après conversion en valeur absolue, nous obtenons presque la même valeur après conversion en forme rectangulaire. Il s'ensuit que la valeur moyenne AVG est presque identique (à peine inférieure) à la valeur 0-P.



Si le signal ne contient que des chocs, la situation est inverse. La surface à l'intérieur des impulsions est petite, et donc la hauteur du rectangle permettant de calculer la valeur moyenne AVG est faible.



Nous avons démontré qu'il n'existe pas de relation fixe entre les valeurs moyennes et les valeurs de crête.

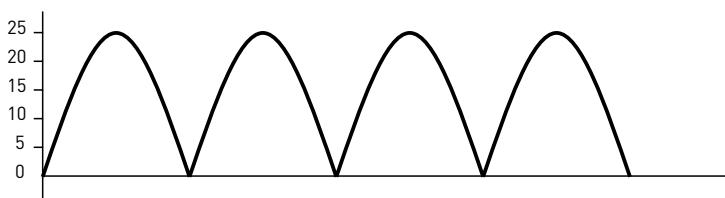
Valeur RMS

La valeur moyenne serait un bon indicateur de l'ampleur des vibrations, mais elle n'est pas utilisée en pratique. Une valeur similaire est utilisée, appelée RMS (Root Mean Square).

Son avantage est qu'elle correspond à l'énergie contenue dans le signal. Imaginons l'intensité de la force qui provoque ensuite les vibrations sous l'angle de l'énergie.

Par exemple en cas de balourd, c'est la force centrifuge qui pose problème, car elle secoue l'ensemble de la machine, sollicite les vis de fixation et exerce une charge sur les roulements. On cherche donc à réduire l'ampleur de la force autant que possible. Cela revient à réduire les vibrations. En réduisant les vibrations, on réduit la force agissant sur la machine.

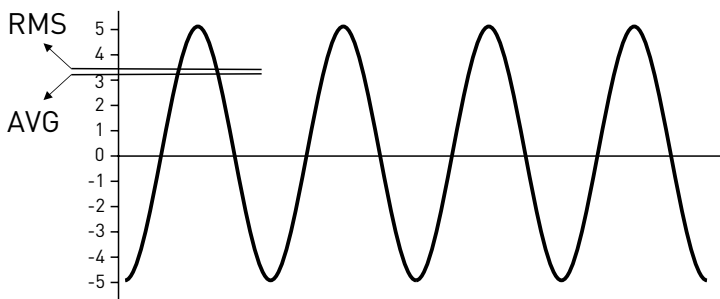
Comment calcule-t-on la valeur RMS ? Elle est similaire à la valeur moyenne, sauf que tous les échantillons du signal sont d'abord élevés au carré. Ceci permet de les transformer simultanément en valeurs positives. On calcule ensuite la racine carrée de la valeur moyenne.



La figure montre le signal $\sin^2$. L'amplitude maximale est passée à 25. Cela correspond à 5^2 , alors que la valeur maximale était de 5 dans le signal d'origine. Nous calculons ensuite la valeur moyenne et en prenons la racine carrée.

Si la forme d'onde du signal correspond à la fonction sinusoïdale, la valeur efficace est égale à la valeur de crête 0-P multipliée par 0,71. Avec une valeur de crête de 5, nous obtenons $RMS = 3,55$. Ceci peut être exprimé sous la forme d'un signal constant (rectangle) de hauteur 3,55 et de largeur égale à la durée du signal.

Je tiens à rappeler que la constante de conversion de 0,71 ne s'applique qu'à une forme d'onde sinusoïdale. L'explication est la même que celle présentée pour la valeur moyenne.



Un peu de math

Prenons un signal numérisé y . Autrement dit, nous disposons d'une séquence d'échantillons $\{y_i\}_{i=1}^N$, avec N valeurs d'échantillons.

$$\text{Alors } AVG = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i|}{N} \quad \text{et} \quad RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N}}$$

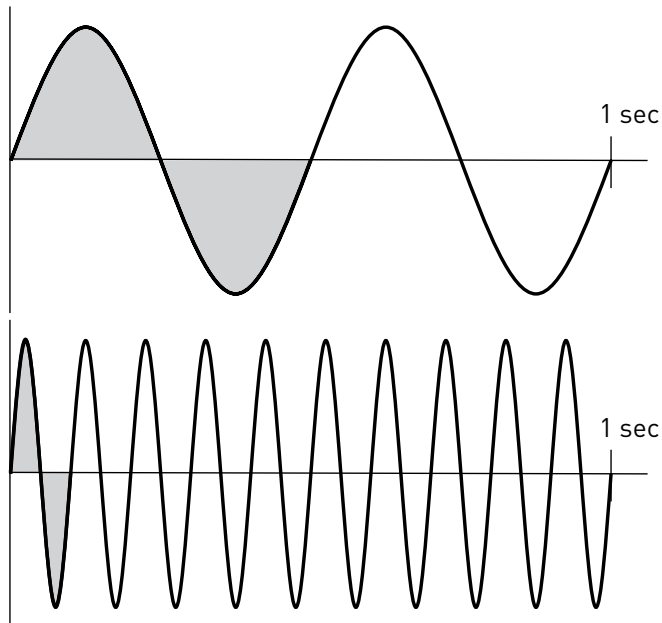
Indépendance de la longueur du signal

Pour les lecteurs curieux, j'ajouterai simplement que les valeurs AVG et RMS ne dépendent pas de la durée du signal. Autrement dit, un signal plus long ne donnera pas de valeurs plus élevées. La raison est claire : il s'agit de valeurs moyennes (divisées par le nombre d'échantillons N). Si le signal comporte davantage d'échan-

tillons, leur somme sera plus grande, mais après division par le nombre d'échantillons, nous obtiendrons la même valeur que pour un signal plus court. Les valeurs RMS et AVG seront stables pour les deux signaux. Pour les machines dont la vitesse est supérieure à 10 Hz (600 tr/min), il suffit de mesurer un signal d'une durée d'une seconde. Pour les machines à faible vitesse, la durée de mesure est plus longue. Le signal doit contenir au moins 10 tours. Cela signifie qu'à une vitesse de 2 Hz, nous mesurons au moins 5 secondes (un tour dure 0,5 seconde).

Qu'est ce que la fréquence?

Différentes raideurs de ressort et différentes masses affectent l'amplitude et la fréquence des vibrations. La fréquence correspond au nombre de périodes de mouvement ascendant et descendant effectuées par la masse en un temps donné, généralement sur 1 seconde.



Sur l'image, nous pouvons voir deux signaux temporels. Les deux durées sont de 1 seconde. La masse ci-dessus a atteint deux fois sa position minimale et maximale en 1 seconde. En dessous, le mouvement de la masse était plus rapide et a atteint dix fois son minimum et son maximum. Il est clair que la masse répète constamment le mouvement ascendant et descendant. Quel est le mouvement de base (le plus court) qui se répète périodiquement ? Ce mouvement de base de haut en bas est indiqué sur la figure. Nous appelons sa durée une période. Comme l'enregistrement complet dure 1 seconde, la période de la vibration la plus lente en haut dure 500 ms. La période de la vibration la plus rapide en bas dure 100 ms.

La fréquence est calculée en Hz et indique le nombre de répétitions du mouvement périodique en une seconde. Dans notre exemple ci-dessus, la fréquence est égale à 2 Hz (soit 2 fois la période) et inférieure à 10 Hz (soit 10 fois la période). Si nous notons T la durée de la période, alors la fréquence est:

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{si } T \text{ est en secondes}),$$

ou:

$$f = \frac{1000}{T} \quad (\text{si } T \text{ est en millisecondes}).$$

Fréquence de vitesse de machine

Même la vitesse (rotation) est un mouvement répétitif, dont la période de base correspond à une rotation de l'arbre. La fréquence de rotation peut également être exprimée en Hz, soit le nombre de rotations par seconde. On l'appellera fréquence de vitesse ou simplement vitesse. Il est plus courant de la mesurer en tr/min.

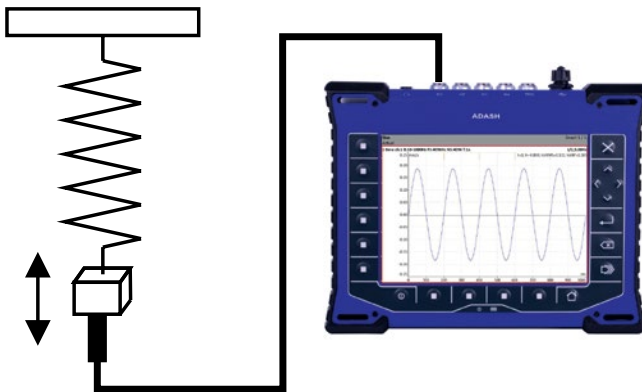
Cette valeur indique le nombre de tours de l'arbre en une minute. La conversion est évidente:

$$\text{RPM} = \text{Hz} * 60 \quad \text{et} \quad \text{Hz} = \frac{\text{RPM}}{60}$$

Le nombre est 60, car une minute correspond à 60 secondes.

Capteur de vibration

Un capteur de vibrations est un dispositif qui convertit les vibrations en signal électrique.



L'image montre le capteur fixé à la masse. Si la masse vibre, un signal électrique apparaît à la sortie du capteur et est mesuré dans l'analyseur. L'instrument affiche

alors la forme d'onde de la vibration, identique à celle que nous avons dessinée précédemment.

Analogie avec les réseaux électriques

Cette mesure est similaire à celle de la tension dans un réseau électrique. Elle a également une amplitude dont la valeur efficace est de 230 V (110 V aux États-Unis).

Dans un réseau électrique, la tension a une forme d'onde correspondant à la fonction sinusoïdale. On peut donc déjà calculer que la valeur 0-P dans le réseau est de $230/0,71 = 324$ V ou $110/0,71 = 155$ V.

La fréquence du réseau est de 50 Hz ou 60 Hz aux États-Unis, ce qui signifie que la durée d'une période est de 20 ms ou 16,7 ms.

Fréquences vibratoires et que faire avec?

Nous avons déjà expliqué la fréquence. Quelle est son importance pour le diagnostic des machines ? Elle est essentielle. Différents défauts se manifestent par des vibrations à différentes fréquences. Lesquelles ? Nous l'expliquerons plus tard.

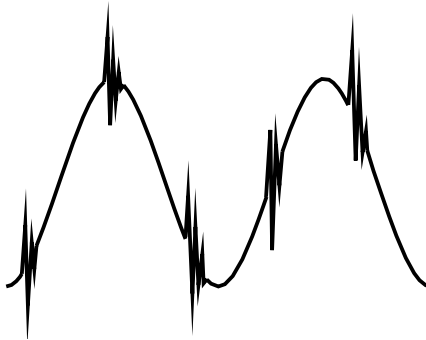
Nous savons également que la valeur efficace (RMS) est utilisée pour la mesure de base de l'amplitude des vibrations. Cette valeur est mesurée pour toute forme de vibration et pas seulement pour la forme sinusoïdale.

Imaginons que nous plaçons un capteur de vibrations sur un haut-parleur et que nous écoutons de la musique. Le haut-parleur vibre et nous entendons la musique. En connectant le signal du capteur à un analyseur de vibrations, nous pouvons facilement mesurer la valeur efficace (RMS). La musique contient une large gamme de fréquences : basses, moyennes et hautes fréquences. Sur un amplificateur audio, nous disposons généralement de trois potentiomètres permettant de régler l'amplitude (c'est-à-dire l'intensité) des basses, moyennes et hautes fréquences. Si nous réglons les basses fréquences au maximum et les moyennes et hautes fréquences au minimum, nous n'entendons que les basses. Si nous mesurons maintenant la valeur efficace (RMS), il s'agit de la valeur des vibrations à basses fréquences. Nous réglons les basses et les médiums au minimum et les aigus au maximum, puis nous n'entendons et ne mesurons que les vibrations à hautes fréquences.

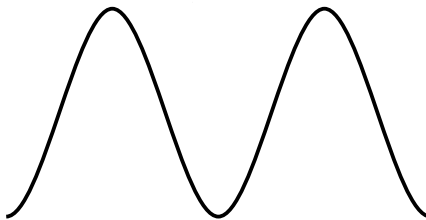
Le diagnostic vibratoire fonctionne de la même manière. Certains défauts surviennent à basses fréquences (par exemple, un déséquilibre), d'autres à hautes fréquences (par exemple, un problème de roulement).

Si nous définissons les paramètres de mesure de la valeur efficace (RMS) dans l'instrument, nous devons toujours définir les fréquences à mesurer, afin de les conserver dans le signal, et celles à ne pas mesurer, afin de les supprimer. Nous définissons toujours un filtre passe-bande avec des fréquences F_{min} et F_{max} . Cela

signifie que toutes les fréquences inférieures à F_{min} et supérieures à F_{max} sont supprimées du signal.



La figure montre un signal temporel simple contenant une composante sinusoïdale à basse fréquence et des chocs vibratoires à haute fréquence. Si nous définissons la mesure de fréquence de manière à ce que les basses fréquences soient traversées et les hautes fréquences filtrées (filtrage passe-bas), nous mesurerons un signal similaire à celui-ci:



Si nous filtrons les basses fréquences et laissons passer les chocs (filtrage passe-haut), nous mesurerons un signal similaire à celui-ci:



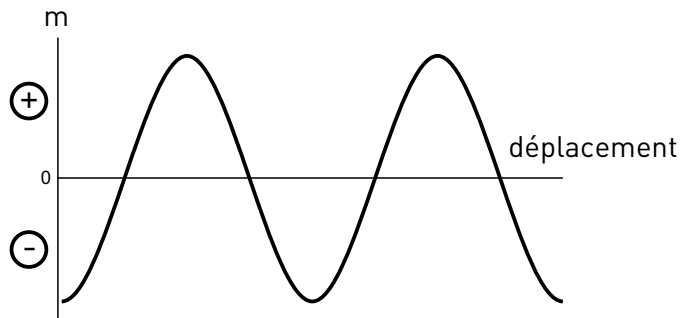
Pour supprimer les hautes fréquences, nous définissons par exemple $F_{min} = 10$ Hz et $F_{max} = 500$ Hz. Pour supprimer les basses fréquences, nous définissons par exemple $F_{min} = 5\,000$ Hz et $F_{max} = 25\,000$ Hz

Unités SI

Toute mesure doit avoir son unité physique. Par exemple, la masse se mesure en kilogrammes et le temps en secondes. Les unités physiques utilisées peuvent différer selon les régions du monde. Pour assurer une certaine compatibilité, le Système international d'unités (SI) a été introduit afin de garantir l'uniformité des valeurs de mesure des quantités quel que soit le lieu de mesure dans le monde. Les unités SI de base comprennent la seconde (s, sec, unité de temps), le mètre (m, unité de longueur), le kilogramme (kg, unité de masse), etc.

Mesure de déplacement

Cette partie sera un peu plus difficile à comprendre.



Reprenons l'exemple du ressort et de la masse sur laquelle nous posons le stylo. Le stylo trace alors une onde de vibrations sur le papier en mouvement. Mais quelle est l'unité du graphique ? Pour mesurer un processus, il est toujours nécessaire de définir son unité physique. Quelle est l'unité de vibration de la masse sur un ressort ? Il est évident que le stylo trace la position de la masse au cours du temps.

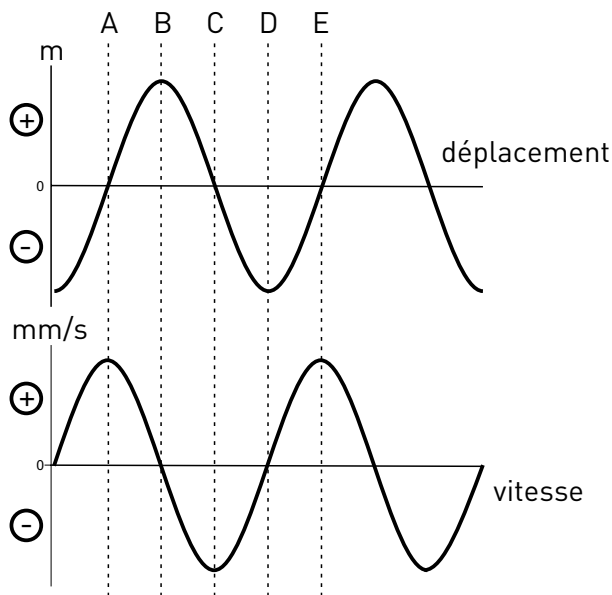
On peut aussi parler de son déplacement. L'unité SI du déplacement est le mètre (m). Elle peut également être convertie en cm, mm, μm , pouce ou millipouce (1 mil = 0,001 pouce).

Si le poids se déplace vers le haut, nous appellerons cette direction plus (positive). La direction vers le bas sera appelée moins (négative). Nous supposons que les valeurs du haut sont positives et celles du bas sont négatives.

Mesure de vélocité

On peut aussi mesurer d'autres grandeurs. La masse monte et descend de manière répétée. On peut y fixer un tachymètre. Il fonctionne comme un tachymètre de voiture. On peut maintenant mesurer la vitesse de déplacement de la masse. Notre tachymètre a le zéro au milieu. L'aiguille peut dévier vers la droite (direction positive) ou vers la gauche (direction négative). Cela dépend si la masse monte (direction positive) ou descend (direction négative). Si un tel tachymètre était installé dans une voiture, il indiquerait les deux vitesses : vers l'avant et vers l'arrière.

Il est clair que dans le cas d'un ressort, la vitesse variera également ; elle ne sera pas stable. Quand la vitesse sera-t-elle maximale ? Il est également clair que la masse se déplace le plus rapidement lorsqu'elle passe par la position médiane. Et quand sera-t-elle la plus faible ? Elle ne sera pas seulement la plus faible, elle sera nulle. Elle le sera lorsqu'elle atteindra la position maximale ou minimale. C'est facile à imaginer. À ces positions extrêmes, la masse s'immobilise complètement car elle doit changer de direction.



Il n'est donc pas surprenant que si la forme du déplacement est sinusoïdale, la forme de la vitesse le soit également. Sur la figure, on peut voir la forme d'onde du déplacement et, en dessous, celle de la vitesse. On constate que la forme d'onde de la vitesse est décalée vers la gauche, soit exactement un quart de période. Si la période est T , le décalage sera de $T/4$ vers la gauche, en arrière dans le temps. On

pourrait également dire que la forme d'onde de la vitesse est décalée de $\frac{3}{4}T$ vers la droite. C'est également vrai. On peut compter le déplacement dans les deux sens car le mouvement se répète périodiquement.

Quelle serait l'unité physique ? Il s'agit de la vitesse, donc l'unité SI est le m/s. Mais pour les vibrations, on obtiendrait de très petites valeurs en m/s. En pratique, on utilise mm/s ou pouce/s.

La figure montre les positions temporelles A, B, C, D et E. En position A, le poids se déplace (direction positive), passant juste par la position médiane et possède une vitesse positive maximale.

Après avoir quitté la position A, la masse se rapproche de la position B. Son déplacement par rapport à la position centrale augmente. La vitesse est positive, car il s'agit d'un mouvement ascendant. Mais la vitesse diminue progressivement lorsque le mouvement s'arrête en position B. Maintenant que la vitesse est nulle, le déplacement positif atteint sa valeur maximale.

Après avoir quitté la position B, la masse se rapproche de la position C, où elle passe par la position médiane. De B à C, la vitesse augmente dans le sens négatif (la masse se déplace vers le bas).

Au point C, la vitesse négative est la plus élevée. Après la position C, la masse se rapproche de la position D, qui correspond au déplacement négatif maximal (vers le bas). La vitesse négative diminue. La masse inverse le sens du mouvement en D, où la vitesse est nulle.

Après avoir quitté la position D, la masse se déplace vers le haut, sa vitesse est donc positive. La masse atteint la position médiane E et le processus se répète. La position E est égale à A.

En ce qui concerne les valeurs de vitesse, elles sont positives (plus) lorsque la masse se déplace vers le haut (nous avons indiqué ce mouvement par plus). Les valeurs de vitesse sont négatives (moins) lorsque la masse se déplace vers le bas.

Mesure d'accélération

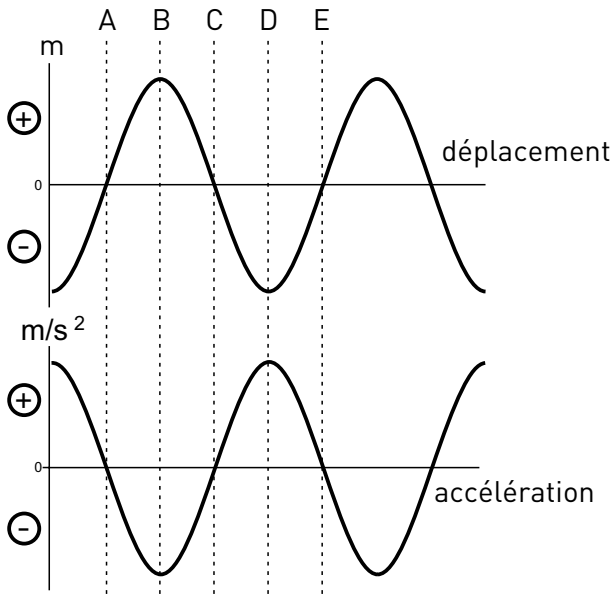
La dernière grandeur utilisée est l'accélération. La nature physique de l'accélération est une variation de vitesse. Si une pierre tombe, elle tombe de plus en plus vite sous l'effet de la gravité. C'est un très bon exemple. Pour qu'un objet accélère ou décélère, une force doit agir sur lui. Pour accélérer une voiture, la force du moteur doit agir (c'est-à-dire une accélération positive dans le sens de la vitesse, c'est-à-dire dans le sens du mouvement). À l'inverse, pour décélérer, la force des freins doit agir (il s'agit d'une accélération négative dans le sens inverse de la vitesse, c'est-à-dire dans le sens du mouvement).

De plus, notre masse sur le ressort est exposée à la force générée par le ressort. Si nous comprimons le ressort, celui-ci crée une force contre la compression et tente de revenir en position centrale. Cependant, lorsque la masse atteint cette position centrale, le mouvement ne s'arrête pas. L'inertie entraîne un déplacement continu

de la masse vers la position médiane. Elle commence à étirer le ressort. Le ressort étiré crée une force dans la direction opposée. Il faut ramener la masse en position médiane. Ce processus est répété.

La force est en réalité l'équivalent de l'accélération. La formule $F = m \cdot a$ décrit la relation entre la masse, la force et l'accélération. La masse m étant constante, l'accélération est directement liée à la force.

La figure suivante illustre le déplacement et l'accélération. L'onde d'accélération est décalée d'une demi-période vers la gauche. En la comparant à l'onde de vitesse, on constate qu'elle est décalée d'un quart de période vers la gauche, soit en arrière. Sans surprise, l'onde d'accélération correspond à nouveau à la fonction sinusoïdale.



Dans ce cas, la compréhension est un peu plus complexe, mais entrons dans le vif du sujet. Décrivons chaque position A à E et les processus intermédiaires.

- A La masse passe par la position médiane avec une vitesse maximale. La vitesse augmentait avant A et diminuera après A. C'est la position médiane, le ressort n'est ni comprimé ni étiré. Aucune force n'agit en A. L'accélération est donc nulle. Imaginons la position de A dans une voiture : avant A, nous appuyons sur l'accélérateur et accélérons. En A, nous déplaçons notre pied de l'accélérateur vers le frein, puis après A, nous appuyons sur le frein et décélérons.
- A-B L'inertie déplace la masse vers le haut et comprime le ressort. Le ressort génère une force vers le bas, d'autant plus forte qu'il est comprimé. Le mou-

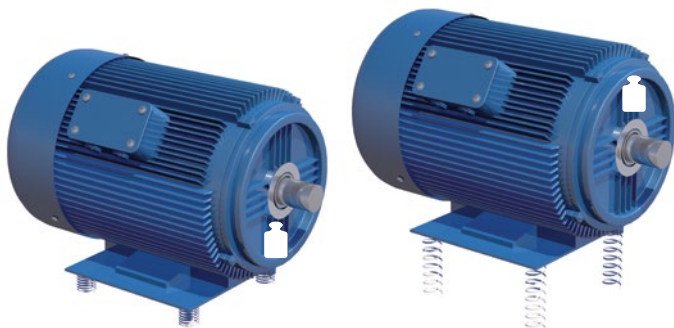
- vement de la masse est positif (mouvement vers le haut), l'accélération (c'est -à-dire la force) est négative (c'est-à-dire contraire au mouvement). Le mouvement de la masse est ralenti.
- B La force du ressort comprimé arrête le mouvement vers le haut. La masse change de direction et devient négative (vers le bas), la vitesse est nulle. Cependant, le ressort est toujours comprimé et génère une force négative (vers le bas) qui amorce le mouvement vers le bas de la masse.
 - B - C La force du ressort comprimé continue de pousser la masse vers le bas et accélère son mouvement (direction négative). Cependant, cette force diminue progressivement. Le ressort moins comprimé génère moins de force. La masse accélère donc moins, mais toujours vers le bas.
 - C La masse passe par la position médiane. C'est l'état neutre du ressort, lorsqu'il n'est ni comprimé ni étiré et ne génère aucune force. L'accélération est nulle.
 - C - D L'inertie maintient la masse en mouvement vers le bas (négatif) et le ressort se tend. Il génère une force ascendante contre le mouvement vers le bas. On a alors un conflit entre l'inertie et la résistance du ressort. La force générée par le ressort continue de réduire l'inertie jusqu'à l'annuler complètement. Il cherche à ramener la masse en position médiane.
 - D La force du ressort tendu a stoppé le mouvement vers le bas. La vitesse est nulle, le sens du mouvement devient positif. Le ressort tendu génère toujours une force positive vers le haut et la masse commence également à se déplacer vers le haut.
 - D - E La masse accélère vers le haut.
 - E Ici, toute la période de mouvement est terminée. La force d'inertie commence à contracter le ressort. Nous avons atteint la même situation qu'en position A.

La machine est une masse sur ressorts

Jusqu'à présent, nous avons montré des exemples de vibrations sur un poids et un ressort. Cela a-t-il un lien avec les vibrations réelles de la machine?

Oui, c'est exactement la même chose. La machine est une masse fixée à sa base par des ressorts. Si des silentblochs en caoutchouc sont présents, on peut voir de vrais ressorts. Mais si la machine est montée avec des vis, celles-ci sont également élastiques et peuvent s'allonger et se raccourcir. Il suffit d'exercer une force importante pour cela.

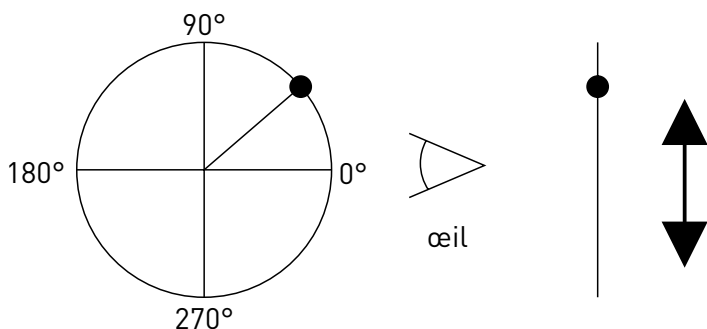
La force qui fait vibrer la machine est, dans la plupart des cas, un déséquilibre. Un point lourd se trouve sur le rotor et crée une force centrifuge lors de sa rotation, ce qui fait vibrer la machine.



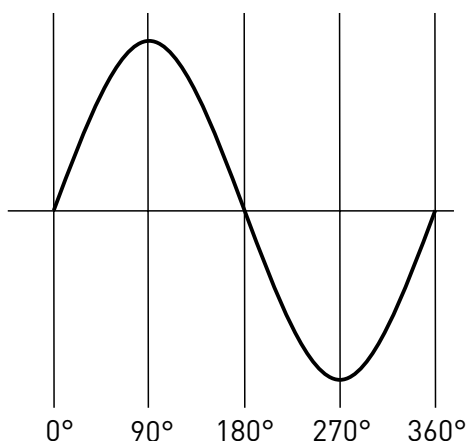
L'icône blanche représentant un poids indique la position du point lourd lorsque les ressorts sont comprimés et tendus.

Période et phase

Pour décrire le déplacement, la vitesse et l'accélération, nous avons dû exprimer le décalage d'un signal par rapport à l'autre. Ce décalage est appelé déphasage. Nous avons utilisé des expressions telles que quart de période ou demi-période. Le décalage pourrait être défini en temps (en secondes). Cependant, cela présente l'inconvénient que la période-temps des différentes fréquences diffère. En pratique, une approche différente est donc utilisée.



Imaginez une balle attachée à une ficelle que nous faisons tourner en cercle. Vue de face, la balle tourne autour du centre. Vue de profil, elle vibre entre deux positions extrêmes. Elle ressemble à une masse sur ressort. En mesurant la forme d'onde de ce mouvement, nous obtenons à nouveau une forme correspondant à la fonction sinusoïdale.



Cette approche permet d'imaginer une période comme une valeur angulaire. La balle fait un tour du cercle pendant une période donnée. Le cercle a 360 degrés. Ainsi, la longueur d'une période peut également être considérée comme égale à 360 degrés. L'avantage de cette approche est qu'elle ne dépend pas de la fréquence. Ainsi, la durée d'une période en secondes n'a aucune importance. Angulairement, elle dure toujours 360 degrés. Si l'on considère ensuite que la forme d'onde de vitesse est décalée d'un quart de période vers la gauche (c'est-à-dire par rapport au temps), on dit qu'elle est décalée de moins 90 degrés. 90 est un quart de 360 et le signe moins représente la direction par rapport au temps.

Nous savons donc maintenant que le déphasage est exprimé en degrés.

Détection et analyse

En pratique, le diagnostic vibratoire comporte deux tâches principales. La première consiste à déterminer si l'état de la machine a changé. C'est ce qu'on appelle la détection des problèmes. La seconde consiste à analyser les vibrations plus en profondeur et à identifier le défaut ou l'usure de la machine.

Les mesures de détection doivent être simples et rapides afin de pouvoir mesurer les machines le plus souvent possible. Les mesures globales (niveau 1) sont les plus utilisées. Le terme « global » signifie que la mesure couvre une large bande de fréquences. La valeur mesurée peut alors être RMS (la plus utilisée), 0-P, P-P, etc.

Mesure globale

Pour indiquer la valeur globale mesurée, il faut toujours indiquer quatre paramètres. Si l'on indique 4,8, cela n'a aucune valeur. Si l'on ajoute une unité, 4,8 mm/s, c'est un peu mieux. Il faut également préciser le type de calcul utilisé (par exemple, RMS). On obtient ainsi 4,8 mm/s_{RMS}. Enfin, la quatrième information concerne la bande de fréquences utilisée, c'est-à-dire le filtre passe-bande utilisé (par exemple, 10-1000 Hz).

L'expression correcte est donc 4,8 mm/s_{RMS} dans la bande 10-1000 Hz..

N'oubliez jamais cette règle de quatre.

Si le type de calcul n'est parfois pas mentionné dans le texte ou les graphiques, il se peut que l'on mesure RMS ou 0-P.

Type de capteur

Si nous savons que nous pouvons mesurer le déplacement, la vitesse et l'accélération des vibrations, nous devons également utiliser ce que nous mesurons en pratique. Dans la plupart des cas les capteurs accéléromètre sont utilisés pour les mesures. Ils sont abordables et permettent des mesures sur une large gamme de fréquences. L'avantage est de pouvoir convertir assez facilement le signal d'accélération en vitesse et en déplacement.

Les très basses et très hautes fréquences présentent quelques complications, mais nous y reviendrons plus tard.

Montage du capteur sur la machine

Pour mesurer avec précision les vibrations d'une machine, le capteur doit être correctement monté sur celle-ci. Il est essentiel de garantir la répétabilité de la mesure. Cela signifie que la mesure doit toujours être effectuée au même endroit et que le capteur doit toujours être monté de la même manière. Il est déconseillé de tenir le capteur à la main et de le presser simplement contre la surface de la machine. Cette méthode de montage affecte principalement les mesures à hautes fréquences. En pratique, on utilise un montage magnétique. Cependant, l'aimant ne peut pas être simplement pressé contre la surface de la machine. Celle-ci n'est pas plane et le capteur pourrait osciller pendant la mesure, ce qui altérerait la valeur mesurée. Il serait impossible de répéter la mesure et d'obtenir la même valeur. C'est pourquoi des pastilles de mesure peuvent être collées à la machine. Elles sont en acier inoxydable, magnétiques et présentent une surface parfaitement plane. Le capteur et l'aimant se maintiennent ainsi parfaitement sur la pastille. La répétabilité de la mesure est ainsi garantie. La mesure est également toujours effectuée au même endroit.



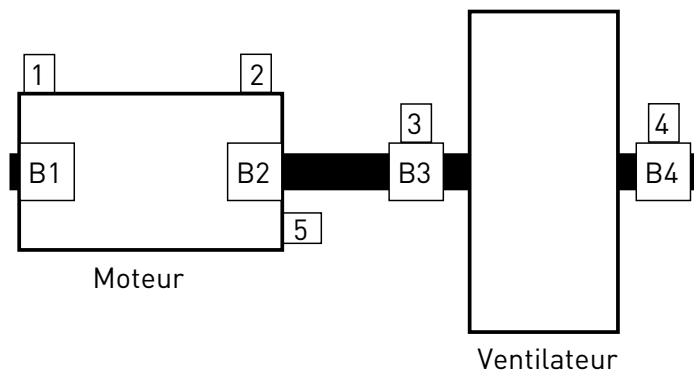
Où mesurer la vibration sur la machine?

Tout d'abord, nous expliquons ce que sont les directions de mesure radiale et axiale, c'est-à-dire le sens de montage du capteur sur la machine.

La direction radiale est la direction perpendiculaire à l'axe de rotation, c'est-à-dire perpendiculaire à l'arbre. Sur un arbre horizontal, le montage vertical, horizontal ou diagonal est indifférent. Sur un arbre vertical, cela n'a aucune incidence.

La direction axiale est la direction parallèle à l'axe de rotation, c'est-à-dire parallèle à l'arbre.

Pour mesurer l'état du roulement, nous devons placer le capteur à proximité du roulement. Le sens de mesure importe peu. Généralement, les directions radiales sont utilisées.



L'image montre une configuration de machine typique, composée d'un moteur et d'un ventilateur. Nous avons 4 roulements marqués de B1 à B4. Pour chaque roulement, nous effectuons une mesure radiale (capteurs 1 à 4) et une mesure axiale sur la machine (capteur 5).

Mesure de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation est mesurée par un capteur de vitesse, appelé tachymètre. Cette sonde émet un faisceau laser que nous pointons vers l'arbre en rotation. Nous plaçons un petit ruban réfléchissant sur l'arbre. Nous connectons ensuite la sonde tachymétrique à l'analyseur, qui reçoit les réflexions de l'arbre. Lorsque le faisceau se réfléchit sur le ruban, le tachymètre envoie une impulsion de tension. L'analyseur mesure ensuite le temps T (en fait, la période de rotation) entre les impulsions et peut calculer la vitesse comme $1/T$.



Quelles valeurs mesurer à l'origine?

Nous commençons toujours par les valeurs RMS globales. Ne pensez pas que ce soit insuffisant. Nous pouvons réaliser des diagnostics vibratoires avec d'excellents résultats via les RMS. Nous pouvons ajouter des méthodes plus sophistiquées ultérieurement. Il est inutile d'utiliser des procédures que nous ne maîtrisons pas parfaitement. Cependant, on pense souvent à tort que le diagnostic vibratoire est aussi simple que la mesure de la température ou de la pression. Une journée de formation suffit pour devenir un expert. Une journée de formation nous permettra de démarrer facilement et d'obtenir des résultats immédiats. Ensuite, nous mettrons du temps à développer et à comprendre progressivement des procédures encore plus complexes. Être expert en diagnostic vibratoire vous permettra de trouver facilement un emploi, car vous connaîtrez des aspects que les autres ignorent. Chaque usine souhaite connaître l'état de ses machines et prévenir les pannes imprévues.

Avec les analyseurs de vibrations Adash, vous trouverez à la fois des mesures de base avec des paramètres prédéfinis et des mesures avancées permettant de régler tous les paramètres selon vos besoins.



Quels sont les défauts vibratoires classiques?

Il existe deux groupes fondamentaux de défauts de machine. Le premier groupe est celui des défaillances mécaniques. Ce sont :

Déséquilibre : lorsque le rotor en rotation présente un point lourd, cette masse crée une force centrifuge qui secoue la machine. C'est comme une roue déséquilibrée sur une voiture.

Desserrage : la machine est fixée à sa base par des boulons. Si l'un d'eux perd de sa rigidité, voire se casse, le défaut est desserré.

Désalignement : par exemple, le moteur est relié à la pompe par un embrayage. Si leurs axes ne sont pas alignés, on parle de désalignement.

Pour les défauts mécaniques, nous mesurons les valeurs de vitesse de vibration, en valeur efficace (RMS), généralement dans la bande de 10 Hz à 1 000 Hz. Si la vitesse est inférieure à 10 Hz (soit 600 tr/min), nous mesurons à partir de 2 Hz, par exemple.

Le deuxième groupe comprend l'usure des roulements, les défauts d'engrenages des boîtes de vitesses, etc. Nous effectuons ici des mesures d'accélération de vibration, en valeur efficace (RMS), généralement dans la bande de 500 Hz jusqu'à la plage maximale de l'analyseur, généralement de 25 kHz. L'accélération est généralement mesurée en g, qui est la valeur de l'accélération due à la pesanteur. $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$, où m/s^2 est l'unité SI. Si g doit être converti en m/s^2 , n'hésitez pas à multiplier par dix.

Comment évaluer les valeurs de mesure?

Nous avons mesuré les premières valeurs. Que faire maintenant?

Il existe des normes relatives aux défauts mécaniques qui fixent des valeurs limites de bon état, d'avertissement et de danger. Si la limite d'avertissement est dépassée, la machine peut continuer à fonctionner, mais des réparations doivent être programmées. Il est également conseillé de mesurer la machine plus fréquemment, car un défaut déjà présent peut s'aggraver rapidement. Le dépassement de la limite de danger doit entraîner l'arrêt de la machine et sa réparation ou son réglage.

La norme la plus utilisée est la norme ISO 20816, qui répertorie plusieurs catégories de machines et spécifie leurs limites de vibration. Elle utilise la mesure de la vitesse de vibration pour détecter les défauts mécaniques.

Malheureusement, il n'existe pas de normes concernant l'état des roulements. Les limites couramment utilisées se situent autour de 1 g_{RMS} pour la limite d'avertissement et de 2 g_{RMS} pour la limite de danger. Nous mesurons uniquement les fréquences élevées, généralement $F_{\text{min}} = 500\text{ Hz}$.

Si nous disposons de plusieurs machines du même type, nous pouvons comparer leurs valeurs. Par exemple, si nous mesurons 1,5, 1,7, 1,4, 5,6 et 1,3 mm/s_{RMS} sur cinq machines, il est clair que la machine 4, avec une valeur de 5,6, n'est pas en bon état.

Si nous avons déjà mesuré plusieurs valeurs au même endroit, par exemple à une semaine d'intervalle, nous pouvons alors observer la tendance. Nous utilisons les règles suivantes : si les valeurs sont plus ou moins identiques dans la tendance ($\pm 15\%$), la machine fonctionne dans un état stable et nous n'avons rien à réparer. Si les valeurs augmentent, il y a un défaut et nous devons le corriger.

Si les valeurs de tendance sont stables au début, nous les prenons comme référence. Nous pouvons alors fixer la limite d'avertissement à deux fois la référence et la limite de danger à cinq fois la référence.

Vérifiez la vitesse de rotation!

Si la machine tourne toujours à la même vitesse, les valeurs mesurées ne sont pas affectées par celle-ci. Attention toutefois aux machines dont la vitesse varie. La va-

leur mesurée varie également lorsque la vitesse varie, même si l'état de la machine reste le même. En cas de balourd, par exemple, la force centrifuge augmente avec la vitesse, ce qui entraîne une augmentation des vibrations. Il en va de même pour l'usure des roulements. Si des impacts sont présents sur les bagues sur lesquelles roulent les billes, les vibrations augmenteront à vitesse élevée. Par conséquent, la vitesse doit toujours être enregistrée avec la mesure sur ces machines. On peut les mesurer avec une sonde tachymétrique et l'analyseur enregistrera la vitesse avec la mesure, saisir la vitesse manuellement avant la mesure ou l'ajouter ultérieurement dans l'ordinateur.

Diagnostiques performants même avec un simple vibromètre



Même avec un instrument simple, des diagnostics très fiables peuvent être réalisés. L'ADASH A4900 VIVRIO en est un exemple.

Il peut mesurer bien plus que des valeurs globales, mais nous n'aborderons pas les fonctionnalités avancées pour le moment. La mesure de base est une mesure de vitesse dans la bande 10-1000 Hz. La méthode d'évaluation est RMS. Ainsi, si nous voulons consigner une valeur dans un rapport, nous écrirons par exemple $4,8 \text{ mm/s}_{\text{RMS}}$ 10-1000 Hz. La deuxième mesure est une mesure d'accélération dans la bande 500-16000 Hz. La méthode est également RMS. Nous écrirons donc par exemple $1,7 \text{ g}_{\text{RMS}}$ 0,5-16 kHz.

Commençons par la mesure de l'accélération. L'utilisation la plus courante est la mesure de l'état des roulements. Des valeurs faibles, jusqu'à environ $0,3 \text{ g}_{\text{RMS}}$, indiquent toujours un excellent état. Nous parlons de roulements standard fonctionnant entre 600 et 3 600

tr/min. À faible vitesse, même une valeur de $0,3 \text{ g}_{\text{RMS}}$ peut indiquer une usure. En revanche, à vitesse plus élevée, la valeur peut atteindre des valeurs encore plus élevées, même si le roulement est en bon état.

L'utilisation des valeurs de vitesse de vibration est un peu plus complexe. Nous recherchons les défauts mécaniques déjà décrits, tels que le balourd, le desserrage et le désalignement.

Si nous avons mesuré des valeurs plus élevées, que ce soit selon la norme ou par expérience, nous pouvons utiliser les critères suivants :

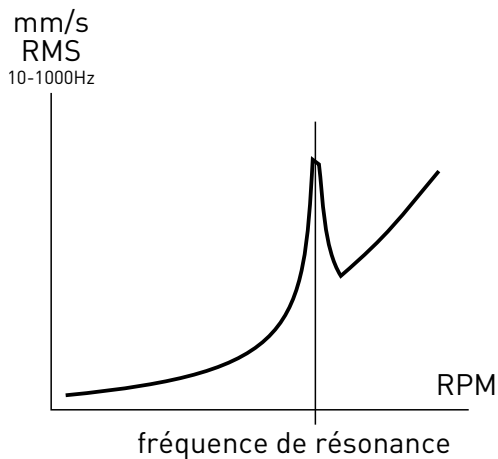
- a) Détection de désalignement. Si les vibrations axiales sont plus élevées que radiales, le désalignement est le défaut le plus probable. Nous devons aligner la machine et refaire la mesure.

- b) Détection de desserrage. Si la condition a) ne s'applique pas, nous mesurons les vibrations au niveau de tous les boulons de fixation de la machine. Si la valeur de vibration est plus élevée sur un boulon que sur les autres, il y a desserrage. Il peut s'agir simplement d'un boulon desserré ou déjà endommagé. Nous reprenons la mesure après la réparation. Il n'est pas nécessaire d'utiliser des pastilles de mesure sur les boulons pour cette mesure. Il s'agit simplement d'une comparaison des valeurs. Il suffit de placer un aimant sur le pied de la machine.
- c) Détection du balourd. Si aucune des conditions (a) et (b) n'est remplie, il s'agit probablement d'un balourd. Après l'équilibrage, reprenez la mesure.

Il peut arriver que les vibrations restent élevées après réparation ou réglage. Il peut alors s'agir de problèmes non mentionnés, comme la résonance ou le balourd électrique.

Qu'est ce que la résonance?

Beaucoup d'entre vous connaissent le concept de vitesse critique. Ce concept est particulièrement important pour les machines légères et imposantes, comme une turbine. Mais le problème se pose également pour les machines ordinaires. Imaginons que nous augmentions la vitesse de la machine et que nous mesurions simultanément la vitesse de vibration dans la bande de 10 à 1 000 Hz. Il est normal qu'avec l'augmentation de la vitesse, la valeur de vibration augmente progressivement. Cependant, il peut arriver que la valeur de vibration augmente rapidement et fortement. Par exemple, une variation relativement faible de la vitesse de 1 300 à 1 400 tr/min double l'amplitude de vibration. Ce phénomène n'est plus normal. Si nous augmentons encore la vitesse de rotation, la vibration diminue à nouveau. C'est un paradoxe inattendu. La courbe de vibration est illustrée sur l'image.

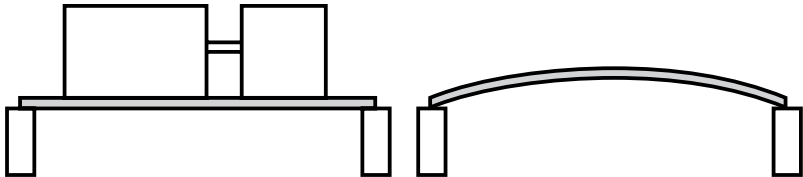


La vitesse est en abscisse et la valeur de vibration en ordonnée. La fréquence du pic est appelée fréquence de résonance. Il s'agit d'une caractéristique mécanique de la machine. À la vitesse de résonance, la force centrifuge déséquilibrée génère soudainement une valeur de vibration beaucoup plus élevée. Cette vitesse est appelée vitesse critique et la machine ne doit en aucun cas fonctionner à cette vitesse. En pratique, ce qui nous préoccupe, cependant, n'est pas la fréquence de résonance de la machine elle-même. Le fabricant de la machine y prête attention et la première vitesse critique doit être supérieure à la vitesse de fonctionnement utilisée. Ceci n'est pas valable pour les turbines, par exemple. La machine elle-même est donc en bon état.

Qu'est-ce qui peut causer un problème de résonance ?

La réponse est simple. Une mauvaise conception du châssis de montage peut en être la cause. Si la machine est montée directement sur une fondation en béton lourde, la résonance ne pose pas de problème. En revanche, si la machine est montée sur un châssis en acier soutenu uniquement par des blocs de béton à chaque extrémité, la résonance peut facilement se produire. Le châssis peut être mal conçu, car trop flexible et le problème apparaîtra.

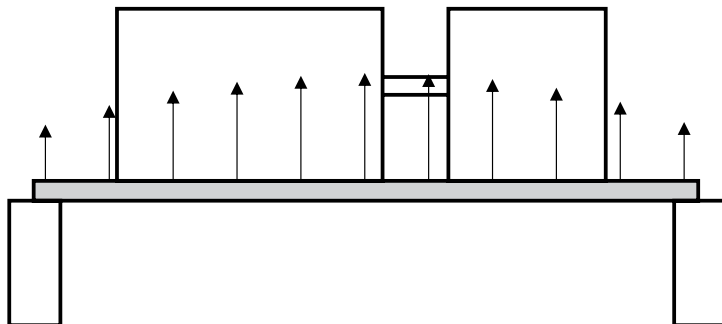
Chaque châssis a ses propres fréquences de résonance. Nous nous intéressons généralement à la première, c'est-à-dire la plus basse. Si la vitesse est proche de la première résonance, le cadre se déforme comme sur l'image suivante. C'est comme une corde de guitare qui vibre à sa première fréquence de résonance. On peut même observer la déformation de la corde à l'œil nu.



La mesure permet de détecter le problème de différentes manières :

- Si la vitesse de la machine est variable (variateur de fréquence), on démarre à faible vitesse et on l'augmente progressivement. Parallèlement, on mesure la vitesse de vibration en mm/s_{RMS} entre 10 et 1 000 Hz. Si la vibration augmente brusquement à une certaine vitesse puis redescend, le problème réside dans la résonance du cadre à cette fréquence = vitesse.
- Si la vitesse ne peut pas être modifiée, on fait fonctionner la machine à sa vitesse de fonctionnement. On lance une mesure continue. Les vibrations sont élevées. On coupe l'alimentation et on observe les valeurs de vibration pendant la décélération. En cas de diminution soudaine et significative, on suspecte que la vitesse de fonctionnement est proche de la fréquence de résonance..
- Si la vitesse ne peut pas être modifiée, nous faisons fonctionner la machine à vitesse de fonctionnement et prenons des mesures en plusieurs points du châssis.

Nous représentons les valeurs mesurées sur l'image.



En cas de déformation du châssis à la fréquence de résonance, les valeurs doivent ressembler à l'image ci-dessus : les valeurs sont faibles sur les bords où se trouvent les supports et les plus élevées au milieu.

Il est nécessaire de changer le châssis ou son support pour résoudre ce problème. L'ajout d'un support au milieu est toujours utile.

Déséquilibre électrique

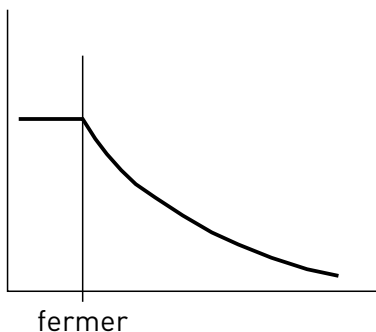
Dans le cas des moteurs électriques, il peut arriver que le bobinage électrique soit défectueux. Il peut être interrompu ou court-circuité à plusieurs endroits. Les forces électromagnétiques ne sont alors pas équilibrées et éloignent le rotor de son centre de masse, c'est-à-dire de sa position idéale. On dirait un déséquilibre. Mais le rééquilibrage du rotor n'apporte pas d'amélioration majeure.

Ce défaut peut être détecté par un simple test. On place un capteur sur le moteur et on lance une mesure continue de la vitesse de vibration efficace dans la bande de 10 à 1 000 Hz. Cela signifie qu'une nouvelle valeur de mesure s'affiche à l'écran environ toutes les secondes. On coupe ensuite l'alimentation du moteur. Il ralentit progressivement et s'arrête au bout d'un certain temps. Deux situations peuvent se produire :

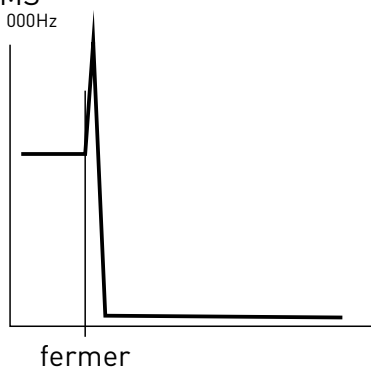
- À la coupure de l'alimentation, les vibrations diminuent lentement jusqu'à l'arrêt du moteur.
- Après la coupure de l'alimentation, les vibrations augmentent brièvement, puis chutent immédiatement à un niveau proche de zéro. .

Les exemples décrits sont illustrés à la page suivante.

mm/s
RMS
10-1 000Hz



mm/s
RMS
10-1 000Hz



À gauche, on observe une diminution lente des vibrations, ce qui signifie que le rotor est effectivement déséquilibré. On observe donc un point lourd.

À droite, on observe une chute brutale des vibrations. Cela signifie que le problème de vibrations est lié à une défaillance des enroulements électriques du stator et du rotor.

Les plus curieux d'entre vous se demanderont maintenant ce que signifie le pic dans le deuxième cas. La réponse est simple : lors de la coupure de courant, les forces électromagnétiques ont disparu. Elles ont dévié le rotor de sa position initiale au centre de masse. Un choc mécanique s'est donc produit lorsque le rotor est revenu au centre de masse, ce qui a provoqué une augmentation des vibrations. Les valeurs suivantes sont très faibles, car le rotor n'est pas déséquilibré mécaniquement.

Comment pratiquer les mesures?

Tout d'abord, nous devons créer l'arborescence de l'usine. Cela signifie créer une liste des machines à mesurer. Ensuite, nous créons une liste de points de mesure pour chaque machine. Pour ces listes, nous utilisons les logiciels que nous achetons avec les instruments de mesure. Par exemple, ADASH propose le logiciel DDS.



Nous créons la structure complète de l'entreprise dans ce logiciel. Nous pouvons créer plusieurs niveaux, comme le hall 1, la section 3 et une liste de machines. Nous créons ensuite des points de mesure sur chaque machine et les mesures requises. Nous transférons ensuite cette liste à l'analyseur et nous pouvons commencer les mesures. Une fois sur le terrain, il suffit de sélectionner dans la liste la machine et le point à mesurer.

Nous n'avons rien à configurer sur le terrain. Tout dans l'analyseur est configuré automatiquement selon la définition de mesure préalablement définie dans le programme informatique.

La liste transférée est appelée ronde de mesure. Elle détermine le lieu où nous allons mesurer.

Au retour de l'itinéraire, nous transférons toutes les mesures à l'ordinateur et pouvons commencer à les évaluer.

Le programme DDS contient de nombreux outils pour automatiser, accélérer et simplifier l'évaluation.

À quelle fréquence devons-nous effectuer les relevés d'itinéraire ? La fréquence optimale est probablement mensuelle. Si notre entreprise est grande, la fréquence peut être plus longue. L'intervalle maximal à ne pas dépasser est de deux mois.

À quoi faut-il faire attention ? Nous ne pouvons pas commettre beaucoup d'erreurs lors des relevés d'itinéraire. Nous avons défini les paramètres à l'avance dans l'ordinateur. Le seul véritable danger est de mesurer au mauvais endroit, voire sur la mauvaise machine. Les données seront alors enregistrées au mauvais endroit dans l'ordinateur. Nous serons confus lors de l'évaluation des données, car les nouvelles données seraient si différentes des précédentes.

Rapports de mesure

Notre évaluation se termine par la rédaction d'un rapport au service de maintenance, précisant les mesures à prendre. Il est important de garder à l'esprit que le personnel de maintenance ne maîtrise pas très bien les concepts de diagnostic vibratoire. Par conséquent, il est inutile de les déranger avec ce sujet. Nous utilisons un vocabulaire qu'ils comprennent. Nos rapports sont aussi concis que possible. Il est inutile d'inclure une longue liste de machines en bon état. Seules les machines nécessitant un réglage ou une réparation doivent figurer dans le rapport. Le service de maintenance privilégie un rapport contenant une brève déclaration : TOUT EST OK.

Evaluation et organisation des mesures

Il est absolument préférable qu'une entreprise achète des équipements de diagnostic vibratoire et dispose de ses propres employés pour effectuer les mesures et leur évaluation. En effet, ces derniers sont en contact permanent avec les machines et reçoivent des informations de maintenance sur les réparations, voire les remplacements effectués.

Il est également possible de sous-traiter le diagnostic vibratoire. Cette solution présente plusieurs inconvénients. Le personnel externe n'intervient qu'à des intervalles définis et mesure le parcours. Il ignore généralement les interventions de maintenance entre les parcours. Son approche est très différente. De nombreuses entreprises comme la vôtre effectuent des mesures. Vous ne disposez pas de l'équipement nécessaire pour effectuer vous-même les mesures si nécessaire. Il sera peut-être trop tard pour effectuer les mesures lors de la prochaine visite d'un analyste externe. Si vous décidez de faire appel à une entreprise externe, nous vous faisons quelques recommandations.

Si une entreprise externe vous propose des mesures, emmenez-la toujours sur la machine. Laissez-la effectuer les mesures et donner son avis sur les résultats. Ne perdez pas votre temps avec une personne qui prétend ne faire que des propositions et laisser les autres effectuer les mesures. Il est toujours positif que la personne effectuant la mesure soit déjà en tenue de travail. Ne vous laissez pas tromper par l'idée que le diagnostic vibratoire est très complexe et incompréhensible pour le client.

Il existe également des solutions où vous mesurez vous-même les trajets et envoyez les données uniquement pour évaluation. On vous assure toujours qu'une équipe d'experts est disponible pour analyser les données. La question est de savoir combien d'entre eux ont déjà travaillé en usine. J'ai entendu un excellent commentaire d'un diagnostiqueur expérimenté, qui pratique la mesure depuis de nombreuses années. Il a déclaré : « Je n'accepterais pas une recommandation de réparation de la part d'une personne que je n'ai jamais vue. Et qui, de plus, n'a jamais vu ma machine. » C'est une définition précise de la façon d'aborder ces services. Vous ne pourrez jamais inclure dans un contrat avec une entreprise externe sa responsabilité financière en cas de non-détection d'un défaut ou de signalement d'un défaut inexistant.

Et qu'en est-il de l'intelligence artificielle ? Chez ADASH, nous avons essayé d'utiliser l'IA à plusieurs reprises. La première fois, c'était vers l'an 2000. Je peux affirmer en toute responsabilité que cela ne sera pas applicable au diagnostic vibratoire. La raison est simple : il n'existera jamais de jeu d'entraînement contenant suffisamment de résultats de mesure sur de nombreux types de machines.

Si je compare cela à la médecine, comment une intelligence artificielle pourrait-elle fonctionner si elle devait diagnostiquer des maladies non seulement chez les humains, mais aussi chez les animaux ? Car l'humain n'est qu'un type d'organisme, et donc un type de machine.

Or, il existe une multitude de types de machines en pratique diagnostique. Soyez donc toujours très vigilant et n'hésitez pas à poser de nombreuses questions lorsque vous évaluez des offres potentielles de diagnostic externe.

Calibration

Aujourd'hui, la gestion des différents systèmes qualité et de leurs audits est généralement une simple formalité administrative. Les instruments modernes ne disposent d'aucun élément de réglage permettant d'ajuster les valeurs mesurées en laboratoire d'étalonnage conformément à la norme.

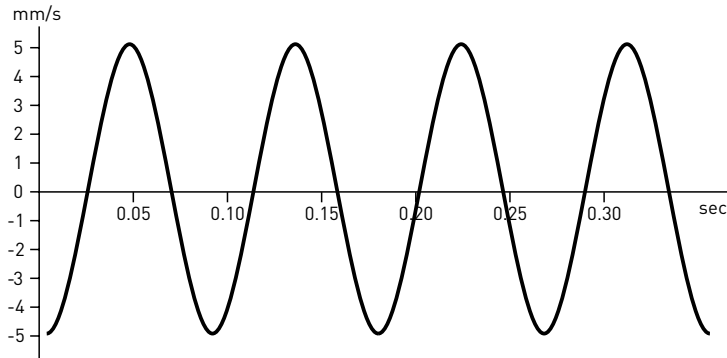
Si nous ne disposons que d'un seul instrument et que nous souhaitons vérifier qu'il mesure correctement, un laboratoire d'étalonnage est judicieux. Cependant, il existe également des instruments électroniques qui simulent un capteur. Ils génèrent des valeurs de tension exactes. Nous les connectons à l'instrument et vérifions que celui-ci affiche la valeur correcte.



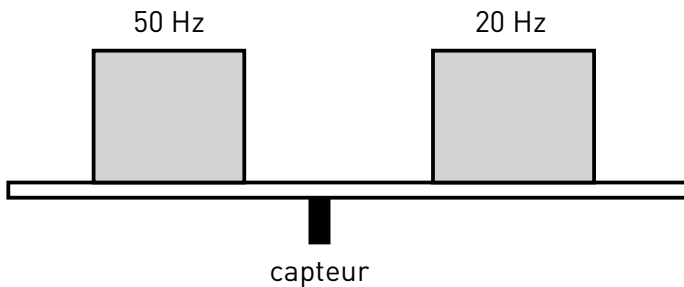
Si nous possédons plusieurs instruments et plusieurs capteurs, nous pouvons passer de l'un à l'autre lors des contrôles. En cas de problème, nous pouvons facilement le déterminer : il peut s'agir d'un capteur, d'un câble ou d'un instrument.

Signal temporel et spectre

Nous avons déjà abordé en détail le signal temporel. Lorsqu'on l'observe, on observe les vibrations dans le temps. Le temps est donc représenté sur l'axe des abscisses.



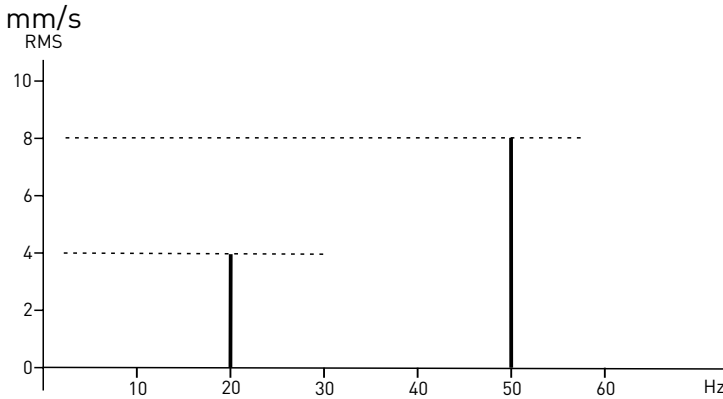
On peut observer les vibrations d'une autre manière. La deuxième méthode consiste à calculer le spectre de fréquence. L'axe des abscisses du spectre n'est pas le temps, mais la fréquence. Le spectre lui-même indique à quelles fréquences les vibrations émettent de l'énergie, c'est-à-dire à quelles fréquences elles sont présentes et quelle est leur intensité, et à quelles fréquences elles sont négligeables.



Par exemple, deux moteurs électriques sont montés sur un châssis commun. La vitesse du premier est de 3 000 tr/min (50 Hz) et celle du second de 1 200 tr/min (20 Hz). On place un capteur sur le châssis, sous les moteurs, et on mesure la valeur efficace des vibrations dans la bande de 10 à 1 000 Hz. On fait tourner uniquement le premier moteur. La valeur mesurée est de 8 mm/s efficace. On arrête maintenant le premier moteur et on fait tourner le second. Nous mesurons maintenant une valeur de 4 mm/s_{RMS}. Nous faisons fonctionner les deux moteurs ensemble. Nous mesurons la valeur vibratoire, qui atteint presque 9 mm/s_{RMS} (soit exactement 8,94 mm/s_{RMS}).

Si nous ne connaissons que cette valeur de 9 mm/s_{RMS}, nous ne pouvons pas la décomposer en deux composantes correspondant aux moteurs individuels fonction-

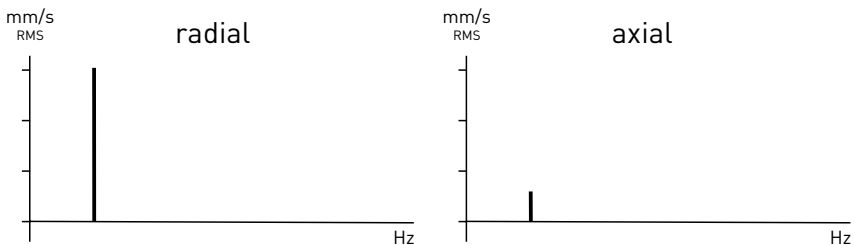
nant séparément. Nous ignorons donc l'état de fonctionnement de chaque moteur. Cependant, en convertissant le signal temporel en spectre, nous pouvons distinguer les composantes individuelles.



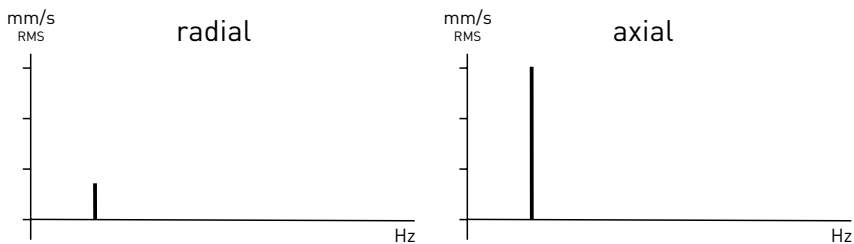
Nous observons deux raies spectrales à 50 Hz et 20 Hz. L'amplitude à 50 Hz est de 8 mm/s et celle à 20 Hz de 4 mm/s. Le spectre nous offre ainsi une nouvelle vision du contenu vibratoire que le signal temporel ne nous permettait pas d'observer.

Les différents défauts des machines diffèrent notamment par l'image fréquentielle. Le spectre devient ainsi un outil puissant pour l'analyse vibratoire. Lors de l'évaluation, nous recherchons les valeurs élevées, c'est-à-dire les raies spectrales élevées, et nous cherchons le défaut qui les provoque.

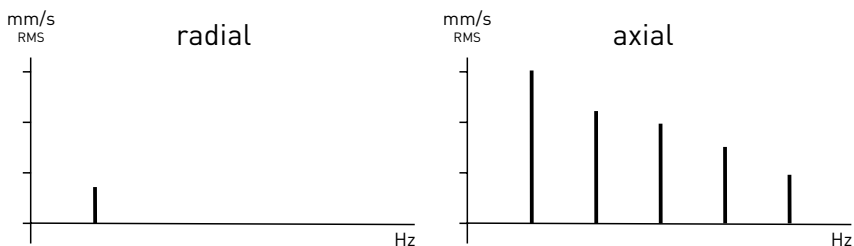
À l'aide de quelques exemples, nous montrerons combien il est facile de distinguer les défauts mécaniques lorsqu'on dispose d'un spectre.



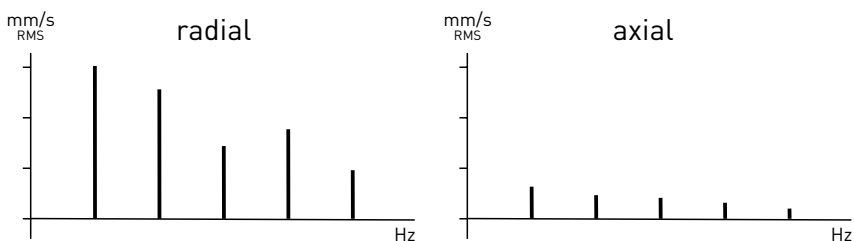
L'amplitude élevée se situe uniquement au niveau de la ligne de vitesse. Si elle est plus élevée dans le sens radial que dans le sens axial, il s'agit d'un déséquilibre.



Si la ligne de vitesse est plus élevée dans le sens axial, il s'agit d'un désalignement.



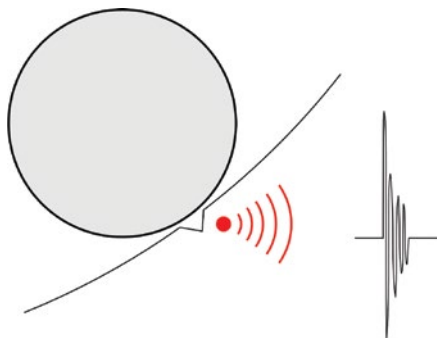
Si des raies à des multiples de la vitesse (appelées harmoniques) sont également présentes, il s'agit d'un désalignement important. Nous parlons toujours du cas où la vibration axiale est plus élevée que la vibration radiale.



Si des composantes harmoniques sont présentes et que la vibration est plus forte dans le sens radial, il s'agit d'un jeu.

Diagnostic avancé d'état de roulement (analyse d'enveloppe)

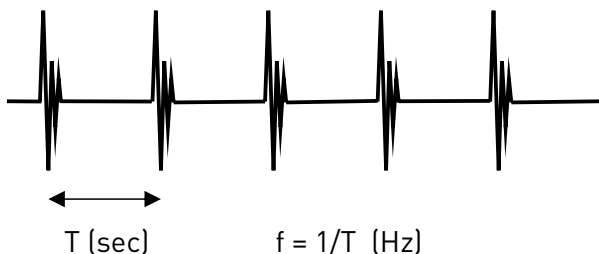
Qu'est-ce que l'usure d'un roulement ? Il s'agit de l'usure des pistes sur lesquelles roulent les billes ou les rouleaux, ainsi que de l'usure de la surface de ces billes ou rouleaux. Cette usure est appelée écaillage.



Que se passe-t-il lorsqu'une bille heurte un défaut (trou) dans la piste du roulement ?

Un choc se produit. C'est comme frapper un roulement avec un marteau. À mesure que les billes heurtent le trou, un signal temporel contenant les chocs individuels est produit.

Connaissant la vitesse et les dimensions du roulement, nous pouvons calculer l'intervalle entre les chocs. Et donc leur intervalle temporel. Et là, la magie opère. Si un trou apparaît sur la bague extérieure, la bague intérieure, sur la bille ou si la cage est fissurée, l'intervalle de temps entre les chocs est différent. Cela signifie que nous pouvons les distinguer.



Si les chocs se produisent à intervalles réguliers, nous pouvons calculer la fréquence, c'est-à-dire le nombre de fois qu'un choc se produit en une seconde.

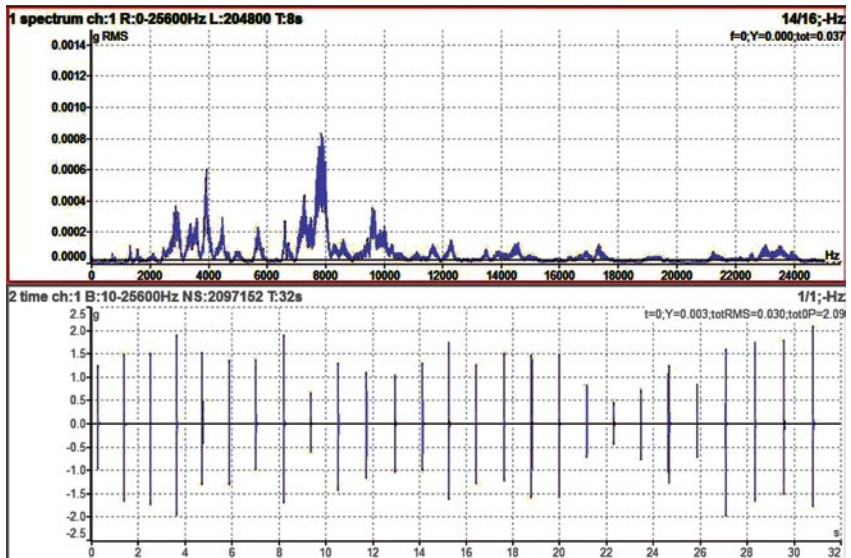
Et comme l'intervalle de temps varie selon les défauts, la fréquence varie également. Ces fréquences sont appelées fréquences de défaut de roulement. Le spectre nous permet de les rechercher.

Il existe quatre fréquences de défaut :

- BPFO Fréquence de passage de la bille sur bague externe
- BPFI Fréquence de passage de la bille sur bague interne
- BSF Fréquence de rotation de la bille
- FTF Fréquence fondamentale de cage

Les fréquences de choc sont élevées. Par conséquent, le signal d'accélération doit toujours être mesuré. Il mesure bien les hautes fréquences.

Mais la situation n'est pas aussi simple. On peut calculer le spectre directement à partir d'un signal temporel avec chocs. Cependant, aucune amplitude aux fréquences de défaut n'est visible. Bien que le signal temporel présente des pics significatifs (2 g), la valeur maximale du spectre est de 0,0008 g_{RMS}.



L'explication est la suivante : la hauteur des raies du spectre correspond aux valeurs RMS, qui correspondent à l'énergie contenue dans le signal. Rappelons l'explication de la valeur RMS et des zones remplies. Le spectre ne répond bien qu'aux zones significatives du signal. Il ne répond pas bien aux valeurs de pic élevées sans zone significative sous le signal.

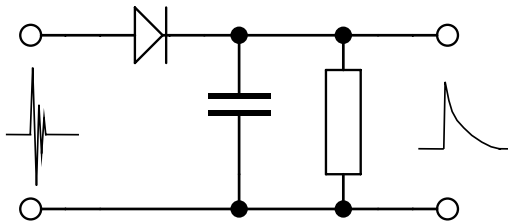
Nous comprenons maintenant pourquoi il est impossible de calculer le spectre directement à partir du signal mesuré. Il faut d'abord l'exploiter. Il faut ajouter des zones significatives. La première étape consiste à filtrer les basses fréquences.



Nous avons déjà décrit cette situation. Nous avons des chocs, mais aussi une forme d'onde sinusoïdale à la fréquence de vitesse. Nous ne voulons pas de cela dans le signal. C'est pourquoi nous filtrons d'abord tout ce qui est inférieur à 500 Hz.



Nous allons maintenant transmettre le signal au modulateur d'enveloppe. Cela ajoutera une zone significative au signal.

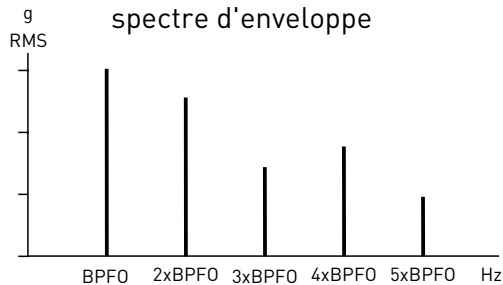


Les chocs individuels sont convertis par une diode (qui ne laisse passer qu'une tension positive), puis elle charge le condensateur C, puis se décharge lentement à travers la résistance R. Cela produit un signal en sortie similaire aux enveloppes de chocs.



Le calcul du spectre réagit bien mieux à ce signal et nous pouvons observer des pics significatifs.

Si le défaut se situe uniquement sur la bague extérieure, nous pouvons alors voir sa fréquence (BPFO) dans le spectre, suivie de ses composantes harmoniques.



Je vais maintenant expliquer pourquoi le signal contient des harmoniques. Si nous calculons un spectre à partir d'un signal ne présentant qu'une onde sinusoïdale à la fréquence f , alors (sous certaines conditions) il n'y aura qu'une seule raie distincte à la fréquence f dans le spectre.

En revanche, si le signal temporel est, par exemple, rectangulaire, le spectre contiendra une fréquence f et de nombreuses harmoniques. Et cela est vrai pour toutes les formes de signal non sinusoïdales. Le spectre réagit toujours à la distorsion du signal en présentant des composantes harmoniques. Or, un signal d'enveloppe est un signal fortement déformé. Il est loin d'être sinusoïdal.

L'avantage de la démodulation est de pouvoir détecter un défaut de roulement très tôt. Connaître les fréquences de défaut permet également de ne pas être perturbé par d'autres fréquences. Elles peuvent être présentes dans le spectre et n'avoir aucun lien avec le défaut de roulement (par exemple, les chocs causés par l'usure des dents d'engrenage).

Nous décrivons maintenant une idée fausse courante concernant le processus de démodulation. Les fréquences de défaut de roulement peuvent être très basses. L'utilisateur se demande s'il doit utiliser un capteur capable de mesurer des fréquences aussi basses. Or, c'est tout le contraire. Les lignes de défaut dans le spectre sont créées par calcul, et non par mesure. Il faut prendre en compte les chocs dans la mesure, puis convertir l'intervalle de temps entre ces chocs en fréquence. Rien n'est mesuré aux fréquences de défaut ! Si nous disposions d'un accéléromètre mesurant à partir de 500 Hz, nous pourrions l'utiliser. Après tout, nous supprimons toutes les fréquences inférieures à 500 Hz avant la modulation d'enveloppe.

Les fréquences de défaut nous permettent de gérer les situations où deux roulements différents sont côte à côte. Nous pouvons clairement voir dans le spectre lequel est endommagé et doit être remplacé.

Ecouter les vibrations

Il s'agit d'une ancienne méthode d'évaluation des vibrations. Un tournevis était pressé face contre la machine, puis sa face arrière était pressée contre l'oreille.

Aujourd'hui encore, nos instruments ADASH nous permettent d'écouter les vibrations. Le signal du capteur est transmis au casque. Les roulements (leur bruit ou leur sifflement) sont parfaitement audibles. Divers phénomènes répétitifs, notamment les chocs à l'intérieur de la machine, sont bien audibles. Bien sûr, il est impossible d'écouter le signal provenant des défauts mécaniques tel le balourd. Autrement dit, nous ne les entendons pas : notre oreille n'est pas sensible à ces basses fréquences et le casque les transmet avec une forte atténuation.

Ultrason

Les ultrasons sont des signaux dont les fréquences sont supérieures à 25 kHz. Il existe des microphones spéciaux capables de capter ces hautes fréquences. Leur sensibilité maximale se situe autour de 40 kHz. Ils peuvent être utilisés pour mesurer les roulements, mais n'offrent aucun avantage par rapport aux mesures effectuées par des capteurs d'accélération. Ils sont utiles pour détecter les fuites d'air sous pression par exemple.

Les analyseurs de vibrations ADASH permettent également cette mesure.

Recalcul des valeurs de l'accélération, de la vitesse et du déplacement

Pour effectuer un tel recalcul simplement en multipliant par une constante, il est nécessaire que le signal ait une forme sinusoïdale. Dans le cas contraire, le recalcul est irréaliste. Mathématiquement, c'est bien sûr possible, mais il faut savoir utiliser les dérivées et les intégrales.

Soit un signal d'accélération avec une valeur efficace (0-P). Rappelons que 0-P = efficace/0,71. La fréquence de l'onde sinusoïdale est f. Les valeurs de vitesse sont alors égales :

$$vel_{RMS} = \frac{acc_{RMS}}{2 * \pi * f} \quad \text{et} \quad vel_{0-P} = \frac{acc_{0-P}}{2 * \pi * f}$$

Les formules suivantes s'appliquent alors au déplacement :

$$disp_{RMS} = \frac{vel_{RMS}}{2 * \pi * f} \quad \text{et} \quad disp_{0-P} = \frac{vel_{0-P}}{2 * \pi * f}$$

N'oublions pas la condition sinusoïdale.

Pourquoi mesurer les basses fréquences en déplacement et les hautes fréquences en accélération?

La meilleure façon de comprendre cela est d'utiliser des exemples. Prenons deux machines présentant des valeurs de vibrations différentes.

- A) La machine fonctionne à une très faible vitesse de 300 tr/min (5 Hz) et la valeur efficace du déplacement est de 100 μm .
- B) Le turbocompresseur à grande vitesse fonctionne à 120 000 tr/min, soit 2 000 Hz, et la valeur efficace de l'accélération est de 1 g.

Si nous mesurons la machine A avec un capteur de déplacement d'une sensibilité de 8 mV/ μm , alors pour une valeur de 100 μm , nous obtenons 800 mV. Un signal électrique d'amplitude de 800 mV est très facile à mesurer. Essayons maintenant de mesurer la machine A avec un capteur d'accélération. Tout d'abord, calculons l'accélération de la machine A. Les formules ci-dessus montrent que :

$$\text{acc}_{\text{RMS}} = \text{disp}_{\text{RMS}} * [2 * \pi * f]^2$$

Indiquez :

$$\text{acc}_{\text{RMS}} = 100 \mu\text{m} * [2 * \pi * 5]^2 \div 100 \mu\text{m} * (31.4)^2 \div 100 \mu\text{m} * 900 = 90\,000 \mu\text{m/s}^2 = 90 \text{ mm/s}^2 = 0.09 \text{ m/s}^2 = 0.009 \text{ g RMS}$$

La valeur de 0,009 g est difficile à mesurer. Avec une sensibilité de capteur de 100 mV/g, cela correspond à une valeur de 0,9 mV, qui peut être masquée par le bruit.

Si nous mesurons la machine B avec un capteur d'accélération d'une sensibilité de 100 mV/g, pour une valeur de 1 g, nous obtenons 100 mV, ce qui est facile à mesurer.

Que se passe-t-il si nous essayons de mesurer la machine B avec un capteur de déplacement ? La formule est :

$$\text{disp}_{\text{RMS}} = \text{acc}_{\text{RMS}} / [2 * \pi * f]^2$$

Remplir les nombres :

$$\text{disp}_{\text{RMS}} = 1 \text{ g} / [2 * \pi * 2\,000]^2 \div 10 \text{ m/s}^2 / (12\,000)^2 = 10 \text{ m/s}^2 / 144\,000\,000 = 6.9 * 10^{-8} \text{ m} = 6.9 * 0.000\,000\,01 = 0.000\,000\,069 \text{ m} = 0.000\,069 \text{ mm} = 0.069 \mu\text{m}.$$

Avec une sensibilité de capteur de 8 mV/ μm , nous obtiendrions 0,5 mV, ce qui est très faible et peut-être déjà couvert par le bruit. Par conséquent, mesurer la machine B avec un capteur de déplacement ne serait pas judicieux non plus.

De même, calculez la valeur du déplacement à 1 Hz pour une accélération de 3 g. Si vous obtenez une valeur efficace de 0,76 m, votre calcul est correct. La valeur efficace de 0,76 mRMS est d'environ 1 m 0-P. Cela signifie que la machine vibrerait de +/- 1 m autour de sa position centrale. Je voulais simplement montrer qu'il est impossible d'obtenir des valeurs d'accélération plus élevées à basses fréquences, car cela nécessiterait des valeurs de déplacement importantes. De même, il est impossible d'obtenir des valeurs de déplacement plus élevées à hautes fréquences, car cela nécessiterait des valeurs d'accélération importantes.

Mesures ONLINE (en continu)

Jusqu'à présent, nous n'avons abordé que les mesures effectuées avec un analyseur de vibrations portable. Il existe également des instruments de mesure en continu. Cela signifie que des capteurs sont montés sur la machine et que son état est surveillé en permanence. Cela présente l'avantage de pouvoir surveiller l'état en continu et de détecter immédiatement tout problème. La mesure continue signifie, par exemple, que nous mesurons une nouvelle valeur de vibration toutes les secondes. Avec la méthode de mesure par trajet, nous obtenons une nouvelle valeur toutes les deux semaines, par exemple.

Bien sûr, cet avantage a un coût. Les systèmes en ligne sont plus chers que les systèmes portables. Si un analyseur portable suffit pour les trajets, un système en ligne est nécessaire pour chaque machine.

Deux points essentiels sont à retenir lors de la configuration d'un système en ligne:

- 1) les performances du processeur ne sont pas infinies ;
- 2) la capacité du disque dur pour le stockage des données n'est pas infinie.

Bien que ces deux affirmations soient claires et incontestables, vous seriez surpris de voir combien d'utilisateurs les oublient lors de la configuration de leur système en ligne. Par exemple, ils ne calculent pas l'espace disque utilisé quotidiennement.



Systèmes ONLINE ADASH A3716



Systèmes ONLINE ADASH A3800

Par le passé, les systèmes n'effectuaient pas de mesures en continu. L'utilisateur définissait la fréquence de mesure, par exemple toutes les 10 minutes.

Les systèmes Adash actuels effectuent des mesures en continu. Lors du développement, nous avons également investi beaucoup d'efforts dans le développement d'algorithmes capables de traiter de grandes quantités de données.

L'idée de base est la suivante : il est inutile de sauvegarder des valeurs de mesure qui ne changent pas. Si la valeur est égale à 3 mm/s, il suffit de la stocker, par exemple, une fois toutes les heures, voire plus. Bien sûr, en observant les graphiques, on comprend qu'un intervalle de 3 heures entre les mesures ne signifie pas qu'une mesure a été prise toutes les 3 heures. On sait que la mesure a été effectuée en permanence et que la valeur est stable. Les algorithmes de stockage d'Adash utilisent cette approche pour tous les types de mesures. L'utilisateur ne doit manquer aucune donnée indiquant un changement d'état de la machine.

La réduction des données signifie également un accès plus rapide aux données de la base de données et un affichage plus rapide des tendances.

Équilibrage

La mesure des vibrations simplifie également l'équilibrage des rotors. Nous n'entrerons pas dans les détails. En pratique, les rotors sont à équilibrer en un ou en deux plans d'équilibrage. L'équilibrage à un seul plan est réalisé sur des rotors étroits dont le rayon est nettement supérieur à la largeur. L'équilibrage à deux plans est réalisé sur des rotors plus larges. On observe l'équilibrage à deux plans en pratique pour l'équilibrage des roues de voiture. Une masse est placée à l'intérieur, l'autre à l'extérieur.

Nous décrivons le cas d'un seul plan, plus simple. Nous connectons un capteur au palier du rotor et une sonde tachymétrique pour mesurer la vitesse. La sonde tachymétrique est importante car nous ne mesurerons que l'amplitude et la phase à la fréquence de rotation. Dans les instruments Adash, cette mesure est appelée mesure ampères-phases. Nous faisons tourner le rotor jusqu'à sa vitesse de fonctionnement et mesurons les valeurs initiales. Ensuite, nous montons une masse d'essai sur le rotor. Il est recommandé que son poids soit environ cinq fois supérieur au balourd résiduel admissible (chaque rotor étant toujours légèrement déséquilibré, le balourd admissible désigne la valeur à laquelle il n'est pas nécessaire d'équilibrer et où la machine peut fonctionner sans limitation). Ensuite, on fait tourner à nouveau le rotor et on mesure les valeurs d'amplitude et de phase lors de l'essai. L'analyseur calcule alors le poids nécessaire et son emplacement. La position de la masse d'équilibrage est lue sur le repère réfléchissant sur l'arbre, utilisé par la sonde tachymétrique. Elle est exprimée en degrés et le cercle complet du rotor est de 360°.

L'équilibrage sur deux plans est similaire, mais des mesures supplémentaires sont effectuées. Les masses d'essai doivent être placées successivement dans le premier, puis dans le second plan.

On obtient ainsi deux masses et deux positions, une pour chaque plan. Il est conseillé de tester d'abord l'équilibrage au bureau, par exemple sur un ventilateur de bureau. Le balourd peut être simulé, par exemple, avec de la pâte à modeler.

Le poids d'équilibrage final doit avoir le même poids et la même position face à la pâte à modeler de simulation.

Pour l'équilibrage, la norme ISO 1940 est utilisée. Elle décrit à la fois les procédures et le balourd résiduel admissible recommandé pour différents types de machines et différentes valeurs de vitesse.

Réglage des paramètres de mesure basique

Réglage capteur

ICP activé/désactivé – La plupart des capteurs contiennent des composants électroniques internes nécessitant une alimentation, appelée ICP® (marque déposée PCB). Si le capteur n'est pas alimenté et que l'ICP est laissé sous tension, il risque de l'endommager. Si un générateur de signaux est connecté à l'entrée de l'analyseur, laissez toujours l'ICP désactivé.

Unité – Un capteur est un dispositif qui convertit une grandeur physique en tension ou en courant. La tension est présente à la sortie du capteur de vibrations et il faut définir la grandeur physique convertie en tension. La plupart des capteurs d'accélération sont utilisés et on définit donc g ou m/s^2 .

Sensibilité – On définit ici le facteur de conversion entre l'unité et la tension de sortie. Pour le g , il est généralement de 100 mV/g. Autrement dit, si la valeur du signal est de 1 g , la sortie du capteur est de 100 mV.

Réglage mesure continue

Canal – Le numéro du canal sur lequel la mesure est effectuée.

Unité – L'unité physique dans laquelle la mesure est effectuée. Attention : ne pas confondre avec l'unité du capteur, par exemple g , car l'instrument peut convertir le signal en mm/s ou μm . Ainsi, pour mesurer l'état des roulements, nous choisirons g ; pour mesurer les défaillances mécaniques, nous choisirons mm/s.

Type de détection – Choix de la méthode d'évaluation. Le plus souvent, nous choisisons RMS, d'autres étant réservées à des cas particuliers.

Bande Fmin, Fmax – Nous définissons ici les fréquences du filtre passe-bande. Il supprime du signal d'entrée toutes les fréquences inférieures à Fmin et supérieures à Fmax. La valeur, par exemple RMS, est ensuite évaluée. Elle dépend des défauts étudiés. Pour les mesures de l'état des roulements, nous choisirons des fréquences élevées, par exemple 5-25,6 kHz. Pour les roulements à faible vitesse, nous choisirons une fréquence Fmin plus faible, par exemple 500 Hz. Pour la mesure des défauts mécaniques, on choisit généralement une fréquence de 10 à 1 000 Hz. Pour les machines à faible vitesse (vitesse inférieure à 600 tr/min, soit moins de 10 Hz), on choisit Fmin, par exemple 1 Hz. Plus la valeur est faible, plus le temps d'attente est long. Ce temps d'attente est nécessaire pour stabiliser le cap-

teur après sa fixation sur le support de mesure. Pour une valeur de 10 Hz, il est de 1 seconde. Pour une valeur de 1 Hz, il est de 10 secondes.

Échantillons – En définissant le nombre d'échantillons, on détermine la durée de la mesure pour le calcul du résultat. Généralement, une durée d'une seconde est suffisante. La mesure doit toujours inclure au moins 10 tours de rotor.

Réglage mesure signal temporel

Nous avons expliqué la mesure du signal temporel à l'aide de l'exemple d'un ressort et de l'enregistrement des vibrations. Les paramètres de base : canal, unité, bande Fmin, bande Fmax et échantillons ont déjà été expliqués dans la section précédente sur les paramètres de mesure généraux.

Fréquence d'échantillonnage – cette valeur détermine la conversion du signal analogique en signal numérique. L'analyseur définit toujours la fréquence d'échantillonnage en fonction de la valeur de bande Fmax définie. Nous vous déconseillons de modifier cette valeur avant d'avoir une meilleure compréhension de la mesure.

Réglage mesure spectre

Nous avons déjà expliqué qu'il s'agit de la conversion d'un signal temporel en spectre. Le calcul est effectué par FFT (transformée de Fourier rapide). Aucune information supplémentaire n'est requise.

Les paramètres Canal et Unité ont déjà été expliqués lors du réglage précédent de la valeur de mesure globale.

Feuâtre – Conservez l'option « Hanning ». La compréhension de la fonction de feuâtre nécessite des connaissances approfondies et n'est pas indispensable pour effectuer des diagnostics.

Bande Fmin – Il s'agit uniquement du réglage de la bande Fmin. Si les fréquences inférieures à 10 Hz ne vous intéressent pas, laissez 10 Hz ; sinon, saisissez une valeur inférieure. Une valeur inférieure augmente le temps de mesure, comme expliqué précédemment pour la mesure globale.

Plage – Réglage de la plage de fréquences du spectre. Généralement, 1 000 Hz suffisent pour des mesures en mm/s. Pour des mesures en g, nous souhaitons observer les hautes fréquences ; nous saisissons donc par exemple 25 600 Hz.

Lignes – Ce réglage est identique à la résolution de l'image. Une haute résolution permet de zoomer sur l'image et d'en visualiser les détails. Lorsqu'on agrandit une image basse résolution, on ne voit que des rectangles sans structure interne. Il en va de même pour le spectre, où deux fréquences proches sont juxtaposées. Pour les séparer, il faut choisir une résolution plus élevée. La valeur df indiquée sous le nombre de lignes indique la différence de fréquence entre les lignes voisines. Si l'on doit séparer deux fréquences distantes de 2 Hz, par exemple, la df doit être d'au moins 0,5 Hz. Une résolution plus élevée implique toujours un temps de mesure plus long. Ce temps se calcule facilement sans calculatrice. On prend la valeur df (c'est-à-dire la distance entre les lignes) en Hz et on calcule $T = 1/df$, T étant le temps de mesure.

Par exemple, si vous définissez la plage et le nombre de lignes de manière à ce que $\Delta f = 0,01$ Hz, la mesure durera 100 secondes.

Moyenne – Les vibrations peuvent ne pas être parfaitement stables ou contenir beaucoup de bruit. Il est judicieux d'utiliser la moyenne. Par exemple, si nous définissons une valeur de 8, huit mesures individuelles sont prises. Une moyenne arithmétique est calculée à partir de ces mesures et enregistrée. Une valeur moyenne de 8 est suffisante dans la plupart des cas.

Réglages mesure démodulation spectrale (enveloppe)

Le concept d'analyse d'enveloppe est également présent dans la littérature. Il s'agit exactement de la même mesure.

Les paramètres Canal, Fenêtre, Unité et Moyenne ont déjà été expliqués précédemment. Les spectres de démodulation ne peuvent être mesurés qu'en accélération ; le choix des unités est donc limité.

Attention : comme expliqué précédemment dans un chapitre séparé, ne confondez pas la signification de Démodulation Fmin, Fmax et celle de Plage.

Démodulation Fmin, Fmax – Fréquences du filtre d'entrée. Lors de la démodulation, ce filtre élimine les fréquences de la vitesse et des harmoniques. Seuls les chocs doivent être conservés, car ils sont nécessaires à la modulation d'enveloppe ultérieure.

Plage – Plage spectrale après application de l'enveloppe. Nous souhaitons ici visualiser les fréquences de défaut des paliers, généralement inférieures à 100 Hz. La plage est donc suffisante pour quelques centaines de Hz.

Lignes – Il n'est pas nécessaire d'avoir beaucoup de lignes. Les fréquences de défaut étant assez éloignées, une résolution élevée n'est pas nécessaire. 1 600 lignes suffisent amplement.

Que dire en conclusion?

Des mesures précises et fiables permettent de détecter rapidement les défauts et dysfonctionnements des machines, ce qui se traduit par des économies de temps et d'argent. Il est exagéré de dire que la mesure deviendra votre assistant indispensable.

Vous ne deviendrez certainement pas un expert dès votre première mesure, mais nous sommes convaincus que vos compétences s'amélioreront avec le temps et que vous pourrez transmettre ce manuel aux débutants. 😊

Après tout, nous savons de quoi nous parlons. Le monde des vibrations est le nôtre. De plus, vous ne serez pas laissé seul. Vous trouverez de nombreux articles, vidéos et autres manuels à ce sujet sur notre site web.

VIDÉOS



MANUELS ET DOCUMENTATIONS



SITE INTERNET



GUIDE AU DIAGNOSTIC VIBRATOIRE



This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

ADASH spol. s r. o.

Hlubinská 32/1379

Ostrava, 702 00, République tchèque

+420 596 232 670

info@adash.com

www.adash.com

1st edition, 2025

© ADASH spol. s r. o.