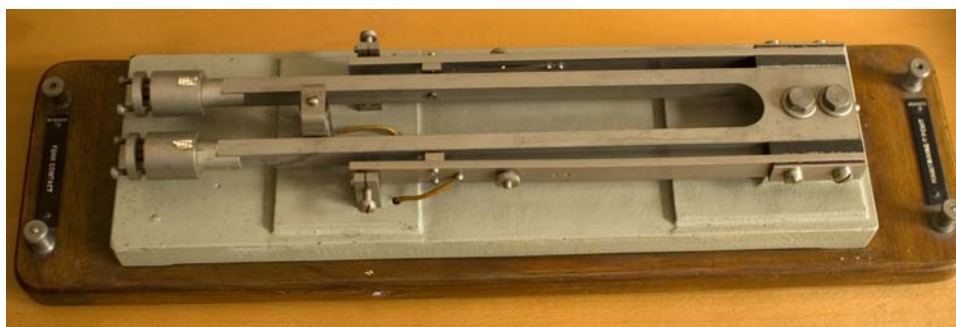


Stemvork-oscillator

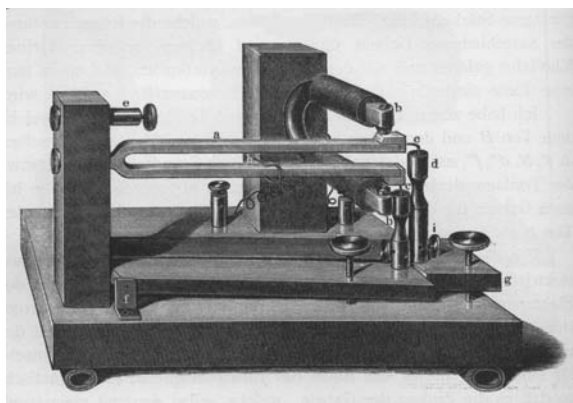
E.H. Dooijes

28 januari 2011



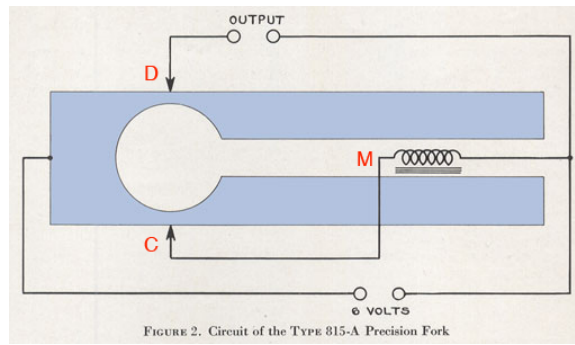
Afb. 1: stemvorkoscillator van Tinsley & Co London, type 3086, No. 68729. Lengte van de basis 54 cm.

Deze stemvork-oscillator dateert uit de jaren '50. Hij is bedoeld als (secundaire) frequentie- of tijdstandaard in electriciteitscentrales, bij fysische experimenten etc. Het principe is al bekend sinds Helmholtz [2], zie afbeelding 2. Bij buitenwaartse uitwijking van de benen wordt tijdelijk een contact C (afb. 3) gesloten; hierdoor wordt een electromagneet M bekrachtigd die de benen binnenwaarts trekt. Aan een tweede contact D ontstaan periodieke impulsen die voor synchronisatie, tijdmarkering etc gebruikt kunnen worden.



Afb. 2: stemvorkoscillator van Helmholtz, 1873.

Van de Tinsley oscillator heb ik geen documentatie kunnen vinden. Maar een soortgelijke stemvork-oscillator van General Radio (eveneens voor 50 Hz) wordt beschreven in [1]: de Type 815-A Precision Fork. We mogen aannemen dat de specificaties van de Tinsley Tuning Fork niet wezenlijk anders zijn. Wel is de General Radio vork anders gedimensioneerd dan het klassieke stemvorkmodel van Tinsley: onderaan de benen is materiaal weggefreest waardoor ze ter plaatse minder stijf zijn. Daardoor kan de bedoelde resonantiefrequentie met een kleinere massa bereikt worden: het Tinsley apparaat weegt bijna twee maal zoveel als dat van GenRad.



Afb. 3: schema van de GenRad stemvorkoscillator. De aanduidingen in kleur zijn door mij toegevoegd.

Voor de 815-A geldt volgens [1]:

- frequentiestabiliteit beter dan 0.01% bij kamertemperatuur;
- temperatuurcoëfficiënt $-5 \cdot 10^{-4}\%$;
- stroomgebruik bij 6 V ongeveer 50 mA.

Er is dus een vermogen 300 mW nodig om deze stemvork in trilling te houden.

Door mij gemeten eigenschappen van de Tinsley 3086 zijn:

- stroomgebruik bij 2 V ongeveer 100 mA;
- amplitude, stroboscopisch gemeten aan het uiteinde van de benen 2 mm;
- massa van elk been 0.25 kg;
- gelijkstroomweerstand van de magneetspoel 2Ω , zelfinductie 5 mH.

In de literatuur is te vinden dat de Q-factor van een stemvork in het algemeen een waarde rond 1000 heeft. Dat geldt natuurlijk niet zonder meer voor een stemvork die voorzien is van mechanische schakelcontacten, zoals in het onderhavige geval.

Ik beschrijf de (autonoom) trillende resonator met de differentiaalvergelijking van de harmonische oscillator

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (1)$$

waarin x de aan het uiteinde gemeten uitwijking van de benen is. m is de effectieve massa, r de dempingscoëfficiënt, k de elasticiteitsconstante. Damping is hier bedoeld als een verzamelwoord voor alle bijdragen aan de energiedissipatie, waaronder het activeren van de contacten C en D, en de emissie van geluid naar de buitenwereld. Uiteraard is (1) een uiterste simplificatie van de dynamica van het apparaat, maar voor deze beschouwing nauwkeurig genoeg. In termen van generieke coëfficiënten [3] kan de vergelijking (1) worden herschreven als

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\eta\omega \frac{dx}{dt} + \omega^2x = 0 \quad (2)$$

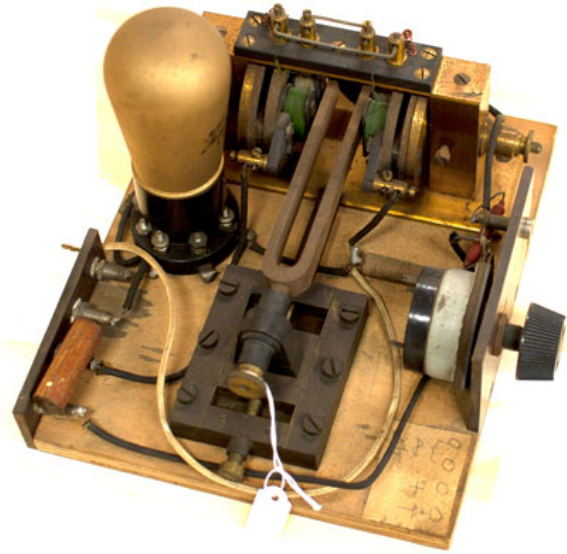
η is de dempingsfactor (kritische demping bij $\eta = 1$; $Q = 1/2\eta$) en ω de resonantiefrequentie bij $\eta = 0$. Aangezien η heel klein zal zijn, zal de werkelijke resonantiefrequentie niet significant verschillen van ω , en de oplossing van de vergelijking zal bij goede benadering zijn van het type $Ae^{-\eta\omega t} \cos \omega t$.

Het is gemakkelijk af te leiden [3] dat de dissipatie van het systeem per seconde gelijk is aan

$$P = \frac{A^2 r \omega^2}{2} = \frac{A^2 m \omega^3}{2Q} \quad (3)$$

Zou ik nu het bovengenoemde inputvermogen 200 mW van de Tinsley vork gelijk te stellen aan P , dan levert vergelijking (3) met $\omega = 2\pi 50 = 314s^{-1}$, $A = 1$ mm, $m = 0.5$ kg, een bedrag $Q = 38$. Dit staat in geen verhouding tot de 'natuurlijke' kwaliteitsfactor die omstreeks 1000 zal bedragen, corresponderend met 8 mW dissipatie. Vermoedelijk gaat het verschil van 192 mW voornamelijk zitten in warmteontwikkeling in de magneetspoel, want stel dat de contacten gedurende 1/10 van een periode gesloten zijn, dan

komen we al op 200 mW voor de koperverliezen. De effectieve Q van de stemvork (rekening houdend met de demping door de schakelcontacten) zal ergens tussen 38 en 1000 liggen. Als de Helmholtz-methode wordt vervangen door een contactvrije methode van excitatie, dan kan de natuurlijke kwaliteitsfactor $Q \approx 1000$ worden uitgebuit. In de jaren '30 werden zulke constructies (in combinatie met een methode om electromagnetisch de eigenfrequentie van de stemvork enigszins te beïnvloeden) gebruikt om de hoge frequentie van de destijds al beschikbare kwartsresonatoren praktisch te kunnen inzetten voor het aandrijven van klokken, zoals beschreven in [4] en [5]. Een hoge harmonische van het stemvorksignaal werd daartoe vergeleken met de zeer stabiele kristalfrequentie. De klok werd aangedreven door een synchroonmotor werkend op de stemvorkfrequentie. Hieronder een foto van een zo'n elektronisch (met een E428 triode) aangedreven stemvorkoscillator.



Afb. 4: stemvorkoscillator, collectie Universiteit van Amsterdam.

Referenties

- [1] The General Radio Experimenter Vol X no 12, May, 1936.
- [2] H. von Helmholtz: Die Lehre von den Tonempfindungen. Vieweg 1862.
- [3] zie bijvoorbeeld K. Magnus: Schwingungen. Teubner 1961.
- [4] A. Bauer: Lothar Rohde's revolutionary portable quartz-clock type CFQ. www.cdvandt.org, zie ook onder 'downloads'.
- [5] W.A. Marrison: The Evolution of the Quartz Crystal Clock, Bell Systems Technical Journal 27(1948), zie ook onder 'downloads'.