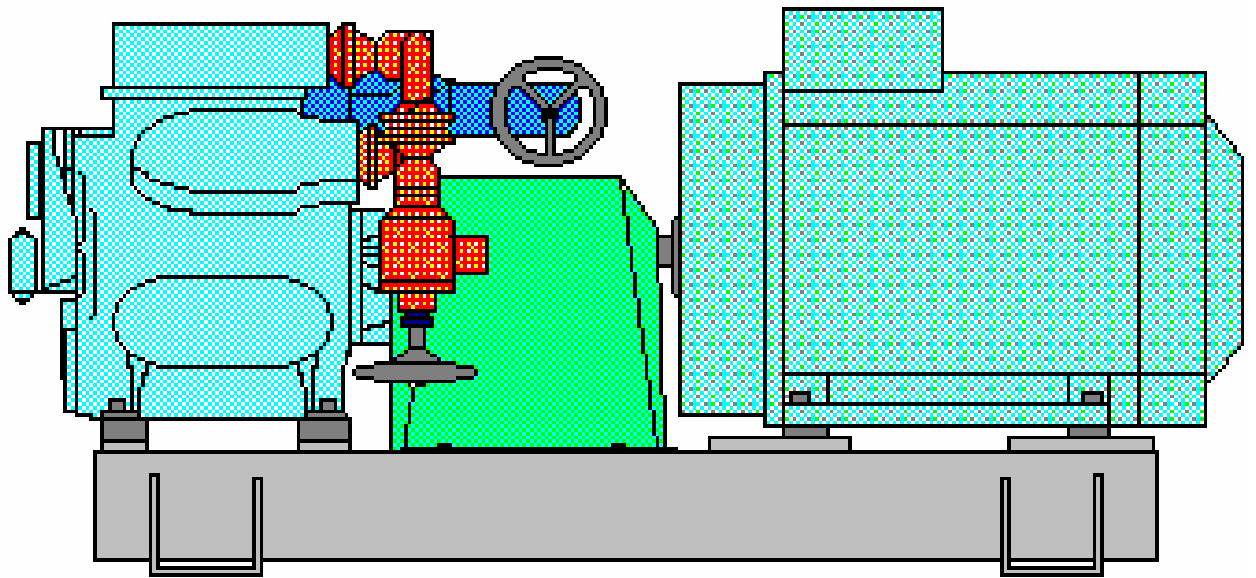


VIBRATIONSANALYS PÅ KYLKOMPRESSORER



**EXAMENSARBETE
YTH-UNDERHÅLL
HÖGSKOLAN I KARLSTAD
HÖSTTERMINEN 1994
UTFÖRT AV ERKKI-J. MÄKINEN**

SAMMANFATTNING

Vid institutionen för yrkestekniska underhållstekniker vid Högskolan i Karlstad, har jag Erkki-j. Mäkinen åtagit mig att utföra en undersökning angående om vibrationsanalys är möjlig att utföra på kylkompressorer. Undersökningen är utförd på Heidenborgs AB i Karlstad.

Undersökningen har bedrivits med nära samarbete med driftpersonal vid Heidenborgs i Karlstad, Orbit monitoring i Solna och Högskolan i Karlstad. Analysarbetet har baserats på dels studier på tillgänglig litteratur och dels på uppmätta driftsdata på en kylkompressor som har varit uppkopplad ca: 2 veckor.

Resultatet av undersökningen är den att det går att utföra en vibrationsanalys på en kylkompressor. Detektfrekvenser kan lokaliseras och föras logg på för senare bedömning huruvida en reparation ska utföras eller ej.

Utan att kunna uppskatta värdet i kronor blir slutsatsen av arbetet att det finns effektivitetsvinster att ernå genom att effektivt planera och utföra ett förebyggande underhåll på en kylkompressor med hjälp av datoriserat underhåll med vibrationsanalysering.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sida
SAMMANFATTNING	I
ILLUSTRATIONSFÖRTECKNING.....	IV
TABELLFÖRTECKNING	V
INLEDNING	1
TACK	2
INTRODUKTION	3
FÖRDELAR MED DATORISERING	6
VIBRATIONSANALYS VID FÖREBYGGANDE UNDERHÅLL	8
VAD ÄR VIBRATIONER ?.....	9
VIBRATIONSPARAMETRAR	10
TEORIER ANGÅENDE DEFEKTFREKVENSER.....	11
ORSAKER TILL VIBRATIONER.....	12
TOLKNING AV MÄTNINGAR.....	12
VIBRATIONSNIVÅ.....	12
VIBRATIONS TREND	14
VIBRATIONSANALYS (Amplitud, frekvens, fas).....	14
OBALANSER.....	14
FELUPPRIKTNING (Axlar, kopplingar).....	14
BÖJDA AXLAR	15
LAGERDEFEKTER	15

OIL WHIRL OCH OIL WHIP	16
EXCENTRICITET	16
MEKANISK INSTABILITET (Lager hylsor, lager bockar, fundament).....	16
ELEKTRISKA ORSAKER (Osymetrisk frigång, lösa eller trasiga rotor delar, böjd axel).....	17
VÄXELRÖRELSER (kolvkompressorer)	17
FRIKTION	17
RESONANS.....	18
VIBRATIONS IDENTIFIKATION	19
UNDERSÖKT SYSTEM	20
MÄTSYSTEMET	21
GIVAR PLACERING	23
MÄTVÄRDEN FRÅN SYSTEMET	24
ANALYSEN	25
DETEKTFREKVENSER	25
TREND MÄTNING.....	26
UPPHOV TILL DETEKTFREKVENSER.....	26
AXELVARVTALET	26
5 X VARVTALET	27
12 X VARVTALET	28
DISKUSSION	29
MÄTMETOD.....	29
SLUTSATSER	30
REFERENSER.....	31

ILLUSTRATIONSFÖRTECKNING

Figur	Sida
Figur 1. Underhållets betydelse	4
Figur 2. Enkelt vibrationssystem	9
Figur 3. Vibrationsspektrum.....	13
Figur 4. felaktigt kullager	15
Figur 5. Undersökt maskinsystem	20
Figur 6. Accelerometer	21
Figur 7. Hastighetsgivare.....	22
Figur 8. Givar placering.....	23
Figur 9. Detektfrekvenser	25
Figur 10. Oljepump.....	27
Figur 11. Vevparti.....	28

TABELLFÖRTECKNING

Tabell	Sida
Tabell 1. Vibrations identifikationstabell	19
Tabell 2. Mätvärden från systemet	24

INLEDNING

Projektarbetet som jag har valt har anknytning till mitt yrke som kyltekniker. Arbetet utfördes under hösten och vintern 1994. Syftet med examensarbetet var att undersöka om det finns någon möjlighet att använda vibrationsanalys för feldetektering av kylkompressorer. Kylkompressorers olika skador, såsom lagerskador och ventilskador har varit och är fortfarande mycket svåra att förutsäga. Oftast finns dessa kompressorer i maskinrum tillsammans med ett flertal andra, och en följd av detta så blir det svårt att upptäcka skador i tid hos enskilda kompressorer på grund av att dessa för ett sådant oväsen tillsammans. Fram tills för några år sedan har de enda metoderna för felsökning varit hörsel, syn och känsel samt de tekniska hjälpmedlen: termometer, oljetest, tryckmätare, ström-, och amperemätare för undersökning av kylkompressorer.

Problem som kylanläggningsägare har är att de inte kan vara säkra på hur lång driftstid som deras kylanläggningar har innan ett haveri är nära förestående. En metod för analysering av maskiner för konditionsbestämning är vibrationsövervakning. Vibrationsövervakning av maskiner är ingen "ny" övervakningsteknik, det har man kunnat göra länge. Man har känt och lyssnat på maskiner ända sedan de började användas, men det är med hjälp datorerna som man nu kan ha kontinuerlig övervakning av maskinernas driftförhållande och kunnat lagra deras data över en längre tidsperiod och sedan analysera maskiners olika felorsaker.

TACK

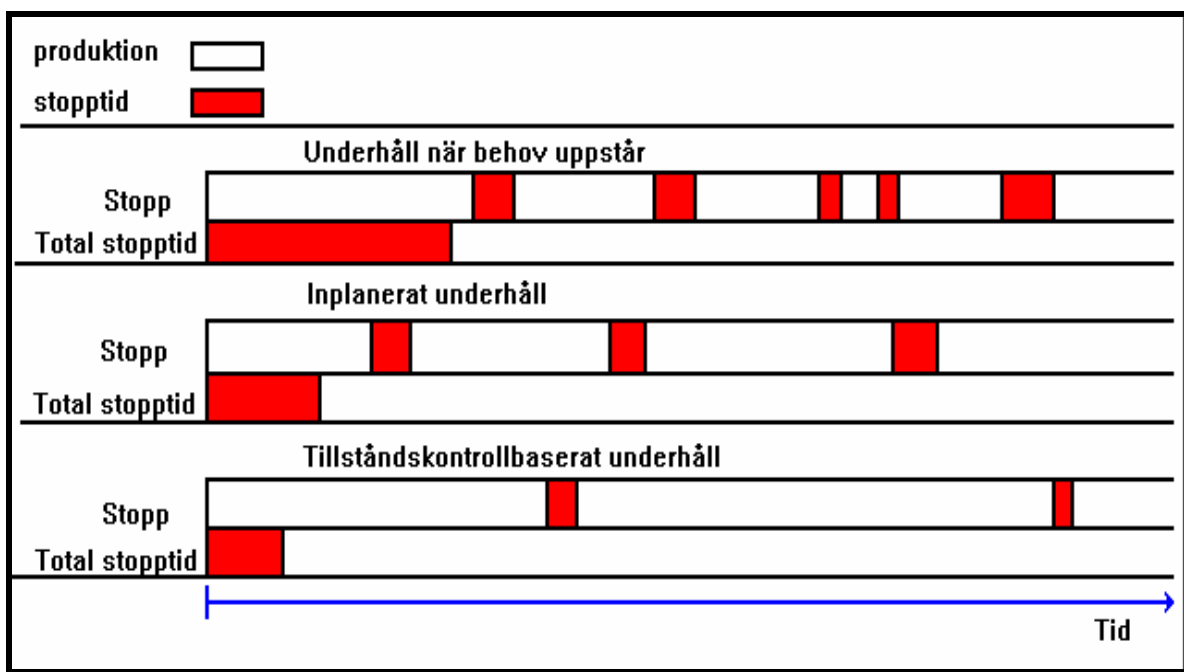
Mina handledare, Hasse Johansson och Anders Jansson vid Högskolan i Karlstad och Orbit monitoring i Solna har bistått med många goda råd och synpunkter under arbetets gång. Till dessa vill jag rikta ett stort tack.

INTRODUKTION

Med en allt hårdare konkurrens mellan företag har det skapats ökade krav på högre tillgänglighet i maskinerna. Dessa krav kan aldrig uppfyllas med den gamla synen på underhållsarbete. Underhållsstrategin enligt den gamla skolan var (och är fortfarande i många företag) haveribaserad, dvs reparation sker först när skadan eller haveriet är ett faktum. Med denna strategi blir de ofrivilliga stoppen både många och långa, med följd att tillgängligheten sjunker. Företag som anammar en sådan filosofi är troligen "dödsdömda" inom en inte alltför avlägsen framtid. Den nya synen på hur underhållsarbete skall bedrivas baseras på tillståndskontroll, dvs att löpande undersöka maskinernas kondition, med denna metod kan begynnande fel upptäckas och i ett tidigt stadium och reparation kan planeras in vid lämpligt tillfälle. Med förebyggande underhåll uppnås många fördelar, t.ex. väsentligt höjd tillgänglighet och minskad reservdelshållning. Summan av detta blir förbättrad lönsamhet och ett bättre konkurrensläge för företaget.

Haveribaserat avhjälpande underhåll betyder oftast en mycket ojämn arbetsbelastning på underhållspersonalen, detta på grund av att haveritillfället och arbetsomfattningen inte kan förutsägas. Oplanerade maskinstopp syns ofta direkt i företagets lönsamhet. Eftersom en stor del av en kyl, frys eller datakylmaskins totala kostnader härrör sig till drifts- och underhållskostnader (DU), är det av största intresse att hålla dessa kostnader på en så låg nivå som möjligt. Stilleståndskostnaden för en fryscompressor eller datacompressor kan bli ganska höga på grund av kassationer i form av upptinat kött i frysar och havererade dataanläggningar på grund av att värmen inte kan transporteras bort.

Ett grundligt konstruerat och genomfört förebyggande underhåll bör följas, till motsatts till ett underhåll som baseras på att avhjälpa fel och haverier när de uppstår. Förebyggande underhåll sänker driftskostnaden genom att bibehålla utrustningens effektivitet och tillgänglighet på en hög nivå, och i vissa fall förbättra utrustningen. En följd av infört förebyggande underhåll är att stillestånd på grund av haverier minskar markant och att anläggningens livslängd förlängs. I dag är det inte reparationen som är den kostsamma delen utan det är stilleståndskostnaden som kan bli avsevärd, så det är av största vikt att dessa stillestånd reduceras ner till ett minimum



Figur 1. Underhållets betydelse

För att få ett riktigt utfört förebyggande underhåll på en maskin så måste det bestämmas vad som ska utföras, när det ska utföras, hur det ska genomföras. Vidare så måste underhållsschemat periodiskt uppdateras för att förbättra den under maskinens hela livslängd. Checklistor bör utvecklas för all mekanisk utrustning som visar varje inspektions punkt och med vilka intervaller inspektionerna ska genomföras. Tillverkarens dokumentation ska i största möjliga utsträckning användas för utvecklande av checklistorna för maskinen. Rapporter från underhållsinsatserna ska användas av underhållspersonalen för att de ska kunna kontrollera att underhållet är genomfört och för att planeringen av reparationer ska kunna planeras in. En del tillverkare har utvecklat kompletta underhållsscheman för sina maskiner och levererat dessa med sina maskiner till användarens förfogande. Utveckling och uppdatering av dessa scheman ska genomföras efter en tids drift när man har fått erfarenhet av utrustningen i fråga, speciellt på komplicerade och kritiska system komponenter som kylmaskiner och tillhörande kontrollutrustning.

I uppbyggnadsskedet kommer det att bli större kostnader för underhållet, det behövs vissa tekniska hjälpmedel t.ex. databaserat underhållssystem, vibrationsinstrument, stötpullsmätare etc. för att ett kunna införa förebyggande underhållssystem. Installation, utbildning, introduktion av nya utrustningar, rutiner etc. belastar också företagen ekonomiskt en tid innan systemet är effektivt. Den genomsnittliga arbetsbelastningen kan fortfarande vara den samma för underhållspersonalen när ett förebyggande underhållssystem är etablerat. Dock har man jämnare belastning genom att de flesta katastrofarbetena nu har ersatts av planerade reparations- och kontrollaktiviteter.

För att kunna bedriva ett effektivt underhållsarbete, med tonvikt på tillståndskontroll, behövs det vissa tekniska hjälpmedel, t.ex. stötpullsmätare eller vibrationsmätutrustning. I detta examensarbete beskrivs vibrationsmätning på en kylkompressor. Målsättningen är att undersöka möjligheterna för skadeupptäckt på kylkompressorer med hjälp av nämnd mätutrustning.

FÖRDELAR MED DATORISERING

Med ökande tillgänglighet och tillförlitlighet av datoriserade resurser kommer fördelarna med datorisering att bli tillgänglig för en allt större del av industrin. Alltmedan funktionen och prestandan varierar så kan de datoriserade fördelarna klassificeras i fyra grundläggande typer:

- Reducerade kostnader
- Större tillgänglighet till information
- Bättre planering
- Ökad kontroll

Reducerade kostnader är den äldsta anledningen för användandet av datorer. Antingen så sänker användandet av dator arbetstiden eller så ökar den mängden utfört arbete. Antingen eller så sänker den kostnaden per utfört arbete.

Större tillgänglighet till information fås genom användandet av databaser på företaget, fördelarna är att informationen är lätt och snabbt åtkomlig vid undersökning av t.ex.:

- Vilka maskiner (genom maskinnummer och placering) är byggda av samma tillverkare ?
- Vilka delar (genom tillverkar och reservdelsnummer) är gemensamma till olika maskiner ?
- Vilka maskiner (genom storlek, funktion och maskinnummer) behöver förebyggande underhåll ?

Vid summering av data av reparationer och underhåll, kan samma data ligga till grund vid en titt på maskinens historia, med information med vilken frekvens och vilka kostnader som underhållet har drabbat maskinen.

Bättre planering. Bättre åtkomst av information kopplat till snabbheten och flexibiliteten hos datorn gör att planeringen av underhållsarbetet går både snabbare och bättre.

Ökad kontroll. Kombinationen av ovanstående fördelar leder till vidare fördelar med datorisering: ökad kontroll av underhållsarbetena. enklare optimering av manualer, bättre driftsplanering med daglig tillsyn. Med sådana resurser så är underhållsarbetarna bättre informerade och kan därför bättre planera och ingripa före problem uppstår, istället för att vänta passivt tills ett haveri uppstår.

VIBRATIONSANALYS VID FÖREBYGGANDE UNDERHÅLL

Det finns ett flertal möjligheter för att undersöka konditionen hos kylmaskiner. De vanliga är att kontrollera att tryck, belastning, flöde och temperatur håller sig inom givna gränser. På senare år har det framkommit att vibrationer alstrade från maskiner innehåller mycket mer detaljerade uppgifter om konditionen hos maskinen än man förut anat. En av fördelarna med vibrationsanalys med hjälp av dator, är att det på ett tidigt stadium går att avgöra om en defekt på t.ex. ett kullager håller på att accelerera till ett haveri, och i många fall går det att förutspå inom vilken tidsperiod haveriet kommer att ske, och med den vetskapen planera in en reparation. Ett resultat av detta är att många företag med "kritiska" maskiner (t.ex. pappersmaskiner och processindustrier och andra företag med maskiner som vid stillestånd på grund av ett haveri kostar mycket pengar), infört vibrationsanalys i sitt underhållsarbete för att kunna planera sitt underhåll bättre, nu har dom fått ett instrument som hjälper dom med att bättre planera in stopp i produktionen för underhåll av sina maskiner.

Inom förebyggande underhåll med vibrationsanalys så är de typiska fallen de, (1) periodiskt insamla data med vibrationsmätare för att kontrollera deras kondition, (2) problemlösning med hjälp av vibrationsanalys, (3) Vid förebyggande underhåll eller efter reparation att maskinen har blivit reparerad på ett fullgott sätt, (4) för att kunna planera in driftstopp för underhåll.

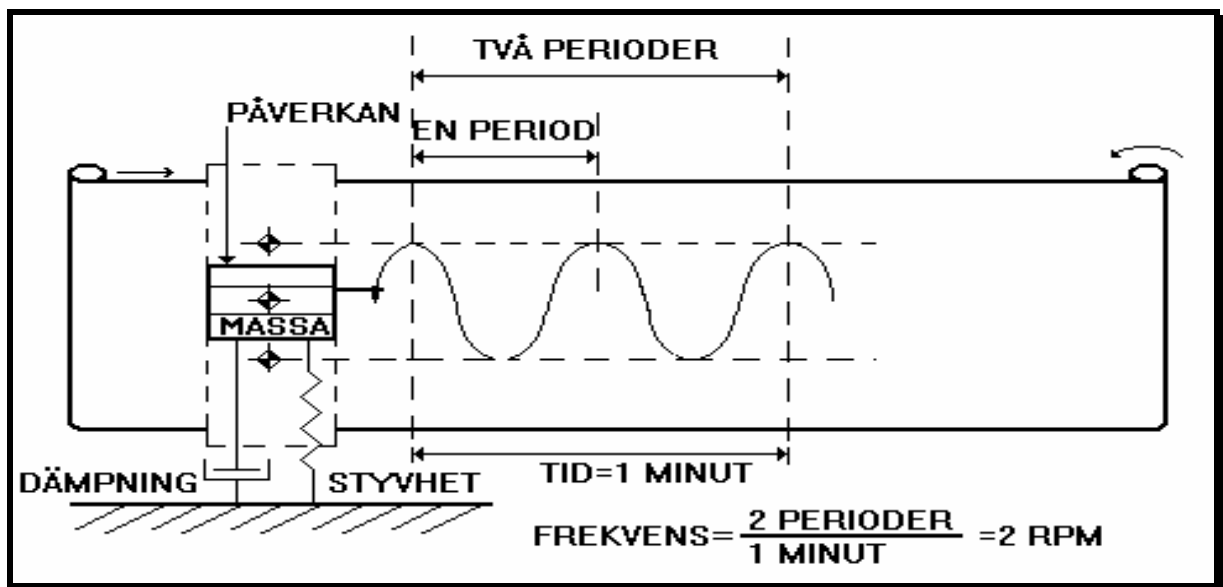
Det typiska tillvägagångssättet är: (1) en första mätning för att fastställa den totala vibrationsnivån i alla riktningar vid varje lager, (2) en analys över de olika frekvenser vid vilket toppar har uppstått. En analys vid varje lager är ett måste för att få ett bra analysresultat att ha som referens vid vidare analysering i ett senare skede. Analysresultatet över nivåer och detektfrekvenser ger tillfredsställande information om konditionen hos det uppmätta objektet.

Efterföljande mätningar skall utföras vid varje lagringspunkt, åtminstone i en riktning. När sedan vid senare mätningar

VAD ÄR VIBRATIONER ?

Vibrationer i maskiner är ett oönskat fenomen i de flesta fall, utom i speciella fall, t.ex. slagbormaskiner, cementvibratorer, skaktransportörer etc. Klart är i alla fall att alla vibrationer har en skadlig inverkan på maskiner och dess delar. Att helt få bort vibrationer och resonanser vore önskvärt, men ej realistiskt. Målet bör istället vara att hålla vibrationer inom acceptabla nivåer. På grund av moderna maskiners allt klenare konstruktion, jämfört med gårdagens maskiner och en allt högre effekt och ökat varvtal, har behovet av noggranna vibrationsmätningar och analyser ökat.

Vibrationer är tekniskt definierat när en kropp svänger omkring sitt medelläge, se 2. Om massan i fig. 2, är satt i rörelse, så kommer den att svänga fram och tillbaka mellan sitt övre och undre läge. Denna rörelse som massan gör från sitt övre läge till sitt undre läge och tillbaka till sitt övre läge är en komplett period av vibration.



Figur 2. Enkelt vibrationssystem

Antalet svängningar per sekund kallas för frekvens och mäts i Hertz (Hz). I en maskin är antalet olika frekvenser många på grund av att en maskin oftast består av många olika rörliga komponenter med sin egen frekvenssignatur.

VIBRATIONSPARAMETRAR

I en vibrationsanalys så kommer man i kontakt med tre olika parametrar, **vågamplitud** vilket är vägrörelsen som kroppen förflyttas åt endera hållet från medelläget, vågamplituden mäts i tusendels millimeter [μm]. Vågamplitud är ett mått på vibrationernas storlek men den säger ingenting om vilka frekvenser det består av. **Vibrationshastighet** är om man betraktar en svängande kropp så ser man att hastigheten är noll då kroppen når sina vändpunkter, någonstans däremellan får hastigheten ett maximalt värde. Denna hastighet är vibrationshastigheten och mäts i millimeter per sekund [mm/s]. I praktiken så består den uppmätta vibrationssignalen av flera summerade värden av olika frekvenser. Därför använder man effektivvärdet av vibrationer i normsammanhang. Vibrationsmätare visar effektivvärdet (RMS). Effektivvärdet fås genom att dividera vibrationshastigheten med roten ur två. **Acceleration** är den tredje storheten (mäts i meter per kvadratsekund [m/s^2]), vilket är beroende av frekvensens kvadrat. På grund av det kvadratiska beroendet så blir accelerationsvärdena stora vid höga frekvenser. Accelerationsparametern är lämplig att använda vid höga vibrationsfrekvenser.

För att komma till rätta med vibrationsproblem måste vibrationstekniska kunskaper utnyttjas redan vid konstruktionen av en maskin.

I detta examensarbete redovisas hur vibrationer kan insamlas från ett flertal mätpunkter för vidare bearbetning med hjälp av ett datoriserat system och sedan utnyttjas för att fastställa konditionen hos kylkompressorer.

TEORIER ANGÅENDE DEFEKTFREKVENSER

Efter utförd insamling av data från olika givare för vibrationsmätning med **ORBIT MONITORING:s** datalogger **TM2000** återstår nu "bara" att göra en analys av frekvensspektrumet.

Först något om de vanligaste maskindefekterna och vid vilka frekvenser dessa uppträder. De defektmönster som beskrivs här är ganska grovt förenklade. I verkligheten har man alltid bakgrundsbrus som gör analysen svårare.

ORSAKER TILL VIBRATIONER

Alla maskiner vibrerar. Dessa vibrationer orsakas av toleranserna som konstruktören har tillåtit för att maskinen har kunna tillverkas, eftersom vissa dimensionsavvikelser måste tillåtas för att det ska vara möjligt att tillverka maskinen eller ingående komponenter i maskinen. Dessa toleranser ger den nya maskinen ett vibrationsmönster som kan användas som referensmönster för efterföljande förebyggande underhåll.

Cirka tjugo typer av olika defekter orsakar dom flesta maskin problemen, och var och en av dessa har sitt eget karakteristiska frekvensmönster. dom viktigaste är givna här.

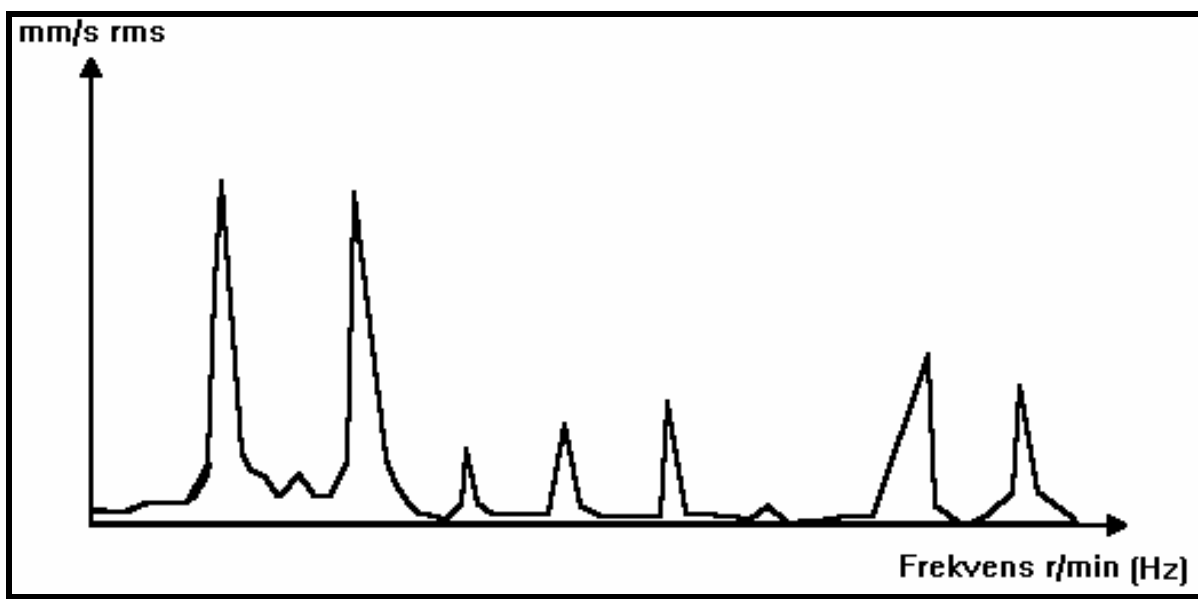
TOLKNING AV MÄTNINGAR

Det är tolkningen som är avgörande om en vibrationsanalys ska bli framgångsrik. Turligt nog så finns det sedan en tid insamlade erfarenheter samlade i bokform och databanker som tillsammans med praktiska erfarenheter gör att den som ska tolka mätvärdena kan utnyttja tidigare erfarenheter och göra en tillräckligt noggrann analys.

VIBRATIONSNIVÅ

Vid analysering av den totala vibrationsnivån kan man använda **SSG 3030**, Skogsindustrins anläggningstekniska samarbetsgrupp (SSG) utgivna rekommendationer för upphandling och drift för maskiner och utrustningar med hänseende till vibrationer. I den kan man utläsa att t.ex. en kolvmaskin (som kylkompressorer tillhör i de flesta fall) ska ingå i klass 6,3. Klass 6,3 innebär att en kolvmaskin med 1500 r/min får ha en tyngdpunktsförskjutning e eller obalans per kg rotorvikt $[(g * mm) / kg = \mu m]$ på 40 μm . Men så finns det sådana maskiner som har sådan konstruktion att dessa inte kan kategoriseras med hjälp av SSG 3030 på grund av deras konstruktion, det kan t.ex. vara borrhammare etc.

Vibrationsnivån som man mäter upp med givarna är väldigt sammansatt, signalen består av en mängd olika resonansfrekvenser i olika riktningar och för att kunna analysera den så måste man ha tillgång till en "FFT- analysator" (Fast Fourier Transform) som delar upp den sammansatta signalen till ett mer detaljerat spektra från givaren (se 3). Sedan med hjälp av spektrats bild av de olika detektfrekvenserna som man kan se, så kan man få en fingervisning om vart i en maskin ett fel finns, t.ex. lagerskada, obalans etc.



Figur 3. Vibrationsspektrum

VIBRATIONS TREND

En av de viktigaste parametrarna är hur trenden ser ut. Till exempel, när vibrationsnivån för en maskin ökar över en period, är det en stark indikation på att maskinen håller på att utveckla en skada. Om maskinen inte visar någon ökande vibrations trend så kan det vara ett tecken på att den får det underhåll som den behöver, och den vara i drift en längre tid innan den behöver underhåll.

VIBRATIONSANALYS (Amplitud, frekvens, fas)

Vid analyseringen av mätvärdena ser man till amplituden, frekvenserna och fassen. Till exempel, en hög vibration vid 1470 r/min från en maskin som har ett driftvarvtal på 1470 r/min indikerar på en obalans, fel uppriktning, elektriskt fel eller en böjd axel. Om vibrationen i axiell riktning för den frekvensen är mer än 50 % av mätvärdet för vibrationen i radiell riktning, begränsas valen till böjd axel eller feluppriktning. Om vidare analysering pekar på oförändrad fas i axiell riktning runt lagringen, så kan man dra den slutsatsen att det måste vara en feluppriktning.

OBALANSER

Obalanser är den mest förekommande orsaken till vibrationer. Även om maskiner sammankopplas med flexibla kopplingar, är en noggrann uppriktning av största betydelse. En god montering ger lugnare gång och ökar livslängden hos lagren och koppling och även andra ingående komponenter i maskinanläggningen. Obalans orsakar problem med sekundärskador, dvs en obalans ger även skador på maskindelar, inte minst lagerskador. Obalanser känner man igen på att vibrationsfrekvensen infaller på varvtalet och vars amplitud i radiell riktning är mer än den dubbla i axiella amplituden. Vid frånslag av maskinen, faller amplituden gradvis.

FELUPPRIKTNING (Axlar, kopplingar)

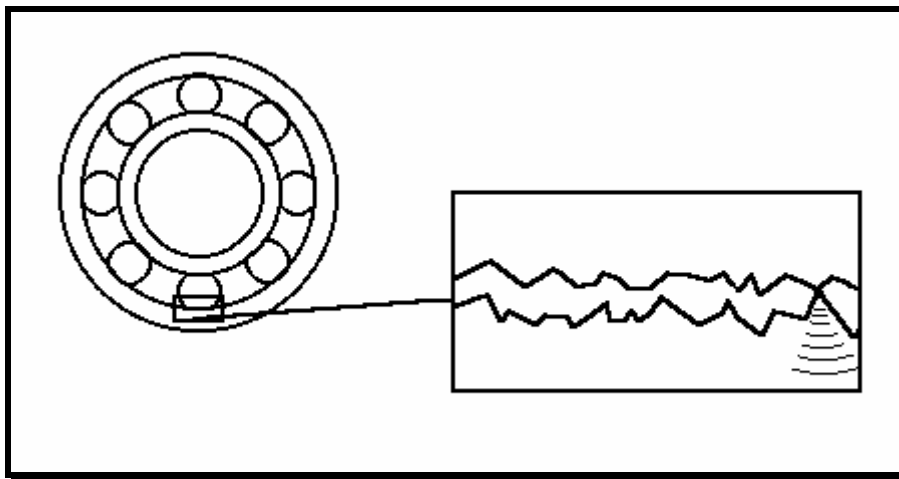
Uppriktningsproblem är det näst vanligaste orsaken till obalanser även om man använder sig av självcenterande lager och flexibla kopplingar. Uppriktningsfel leder till sekundärskador (bl.a. lagerskador). Alla maskindelar mår dåligt av feluppriktningar. Lager slits, fundament spricker och maskinens livslängd förkortas. Feluppriktningar visar sig i frekvensdiagram med en dominant topp vid dubbla varvtalet, defekten dominerar i axiell riktning om det är ett vinkelfel, och i radiell riktning om det är ett parallellfel. Alla direktkopplade maskiner bör kontrolleras noggrant varje år för uppriktningsfel. Slutlig uppriktning skall utföras efter det att maskinen kommit till sin driftstemperatur.

BÖJDA AXLAR

Böjd axel kommer att uppvisa en hög topp vid rotationsvarvtalet i axiell riktning (dvs i axelns längsled) i frekvensspektrat Vi kommer också få en topp vid dubbla varvtalet om axeln är böjd vid kopplingen. Mönstret kommer att vara stationärt i tiden, dvs tidssignalens mönster upprepas hela tiden med ett visst intervall.

LAGERDEFEKTER

Lagerdefekter (förutom glidlager) detekteras genom att mäta upp stötvågen som en skada åstadkommer. Skador på inner, hållare, kulor och yttering har olika detektfrekvens på grund av olika geometrier hos de olika delarna. Har man höga amplituder som i frekvens överensstämmer med beräknade detektfrekvenser är sannolikheten stor att det är en lagerskada. Repetitionsfrekvenserna varierar med varvtalet men också med dimensionerna på lagret samt antal rullkroppar och om skadan finns i ytteringsbanan alternativt innerringsbanan eller på rullkropparna. Detektfrekvensen ligger i det radiella planet.



Figur 4. felaktigt kullager

OIL WHIRL OCH OIL WHIP

Vid glidlager är det "oil whirl" och "oil whip" som man vill undvika. Oil whirl är att om vi har en smörjfilmshinna med filmtjocklek som varierar med tiden och i radiell riktning. Vi kommer att få ett vibrationsmönster som kommer att vara konstant i tiden och dominera i radiell riktning vid 40-46 % av axelns varvtal. Oil whip uppstår då oljefilmen bryts och vi får metall mot metall kontakt i ett glidlager. Defektmönstret kommer i det här fallet att bestå av höga toppar som ligger lägre än axelns varvtal, frekvensen kommer att ligga på axelns resonansfrekvens, mönstret kommer att vara stationärt i tiden. Vibrationsriktningen kommer att ligga i radialplanet.

EXCENTRICITET

Med excentricitet menas när tyngdpunkten är förskjuten från t.ex. axelns centrum. Vibrationen visar sig vid varvtalet utan övertoner.

MEKANISK INSTABILITET (Lager hylsor, lager bockar, fundament)

Vibrationerna visar sig vid dubbla varvtalet med två övertoner som inte är stadiga i tiden. Lös uppställning och lös koppling orsakar ofta detta mönster.

ELEKTRISKA ORSAKER (Osymmetrisk frigång, lösa eller trasiga rotor delar, böjd axel)

Vibrationer i elmotorer är skadliga för elmotorns lindningar som kan skakas av på grund av vibrationerna och mekaniskt förstöra isoleringen. Vibrationerna kan orsakas av feluppriktning eller vara fortplantade från den drivna enheten eller så kan orsaken till vibrationerna vara ett elektriskt fel i elmotorn. Om vibrationerna upphör efter att motorn gjorts spänningslös (och motorn varvar sakta ner) är det elektriskt orsakad obalans. Elektrisk obalans i elmotorn uppstår när den magnetiska attraktionen mellan stator och rotor är ojämn runt periferin av motorn. Denna ojämnhet gör att axeln böjer sig medan den roterar och därigenom orsaka mekanisk obalans. Elektrisk obalans indikerar oftast på ett elektriskt fel, som t.ex. öppen stator-, eller rotorlindning, eller kortslutet lindningsfält i en synkronmotor. Vibrationerna visar sig vid varvtalet och/eller två gånger nätfrekvensen (oftast 3000 och 6000 r/min). Amplituden faller snabbt vid spänningsbortfall. Vibrationerna kan också komma från att fläkten är skadad eller har kontakt med en fast del av motorn

VÄXELRÖRELSER (kolvkompressor)

Vibrationerna visar sig vid en, två, tre och högre multipplar av varvtalet. Typiskt mönster är att det finns en dominant topp vid dubbla varvtalet

FRIKTION

Vibrationstoppar kan uppstå på många ställen samtidigt med varierande amplitud när friktionen är konstant, men den kan också uppstå en eller två gånger per axelvarv.

RESONANS

Resonans är då svängningskällans svängningstal och maskinen den är kopplad till har samma svängningstal. Amplituden når sitt maximum vid resonans, och resonansens skärpa avtar med dämpningen i det svängande systemet. Resonans är mycket skadligt för ett maskinsystem med t.ex. elmotor, koppling och kompressor, då t.ex. motorns resonansfrekvens överensstämmer med både kopplingens och kompressorns resonanser. Då detta uppstår håller inte materialet i systemet länge utan det kommer att brista någonstans. Systemets resonansfrekvens kan beräknas om man känner till fjäderkonstanten K (N/m) och dess massa m (Kg).

$$f = 1/2\pi \times \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Där: k = Fjäderstyvheten, m = massan

VIBRATIONS IDENTIFIKATION

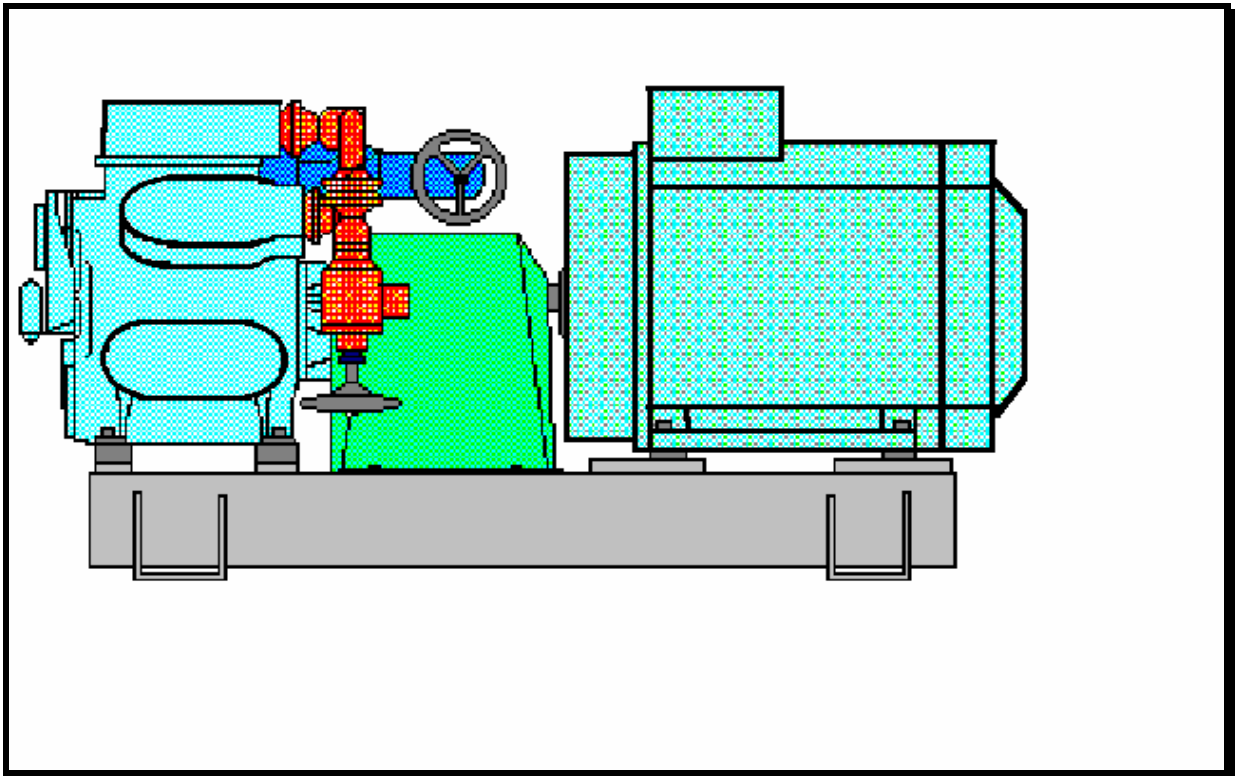
Orsak	detektfrekvens	Dominant plan	Styrka	Kommentarer
Obalans	1 x r/min	Radiellt	Proportionell mot obalans Störst i radiell riktning	Vanligaste orsaken till vibration
Feluppriktning parallellfel	1 & 2 x r/min	Radiellt	Stabil	De flesta uppriktningfelen är en kombination av dessa. Felen finns oftast i vertikallplanet, vid långa axelkopplingar är 1 x r/min dominant. Använd indikatorklocka för att säkerställa orsak. Om glidlagrade maskiner och inga kopplings fel finns, balansera rotorn.
Feluppriktning Vinkelfel	1 & 2 x r/min	Axiellt	Stabil	
Feluppriktning Vinkel och parallellfel	1 & 2 x r/min	Radiellt och Axiellt	Stabil	
Böjd axel	1 x r/min. (2 x r/min om den är böjd vid kopplingen)	Axiell	Stabil	Kast vid rotor uppenbarar sig som obalans, kast vid koppling som uppriktningfel.
Koppling	1 x r/min.	Axiell	Stor i axiell riktning 50% eller mer av radiell vibration	
Lager fel	Högt, flera gånger varvtalet	Radiellt, utom vid axiell last	Ostadig, ökar använd hastighetsmätning om möjligt	
Glidlager	40 -46 % av r/min	Radiell	Ökar med förslitningen	
Excentricitet	1 x r/min 1 x och 2 x nätfrekvens	Radiellt	Stabil (se kommentar)	Varierar (slår) i amplitud och fas om elektriskt fel finns parallellt
Kuggfel	Hög, antal kugg x r/min, samt dess övertoner	Oregelbundet	Låg, använd hastighetsmätning om möjligt	
Lösa delar	2 x r/min	Radiell	Hög, stabil	Oftast tillsammans med obalans och/eller feluppriktning
Slitna drivremmar	1, 2, 3 & 4 x r/min av rem hastigheten	Radiellt, mest i linje med remmar	Oregelbunden eller pulserande	Lättast att upptäcka med stroboskoplampa $\text{Remfrekvens} = \frac{3,14 \times \text{Delningsdiameter}}{\text{Remlängd}}$
Elektriska fel	1 x r/min, eller 1 eller 2 x nätfrekvensen	Enkel eller ett roterande dubbelmärke	Stabil Försvinner vid spännings bortfall	Om vibrationen försvinner vid spänningsbortfall är orsaken elektrisk
Aerodynamiska och hydrauliska krafter	1 x r/min eller antal blad på fläkt eller pumphjul x r/min			Uppstår oftast vid resonans problem
Resonans	Periodisk störning som exiterar de naturliga egenfrekvenserna fördras	Axiellt eller radiellt	Stabil, men överförd energi beror på störkraft och dämpning	Frekvensen oberoende av varvtalet
Kolvrörelser	1, 2 & högre x r/min	Radiellt		Vibrationer p.g.a. kolvrörelser kan endast reduceras genom konstruktionsändring eller isolering

Tabell 1. Vibrations identifikationstabell

UNDERSÖKT SYSTEM

Ingående maskiner:

- **Elmotorn** är en ASEA M225 S med varvtalet 1470 r/min som är balanserad till 2,8 mm/s
- **Kopplingen** är en LAYRUB 2/4-77176 rörlig koppling.
- **Kompressorn** är en STAL P6.

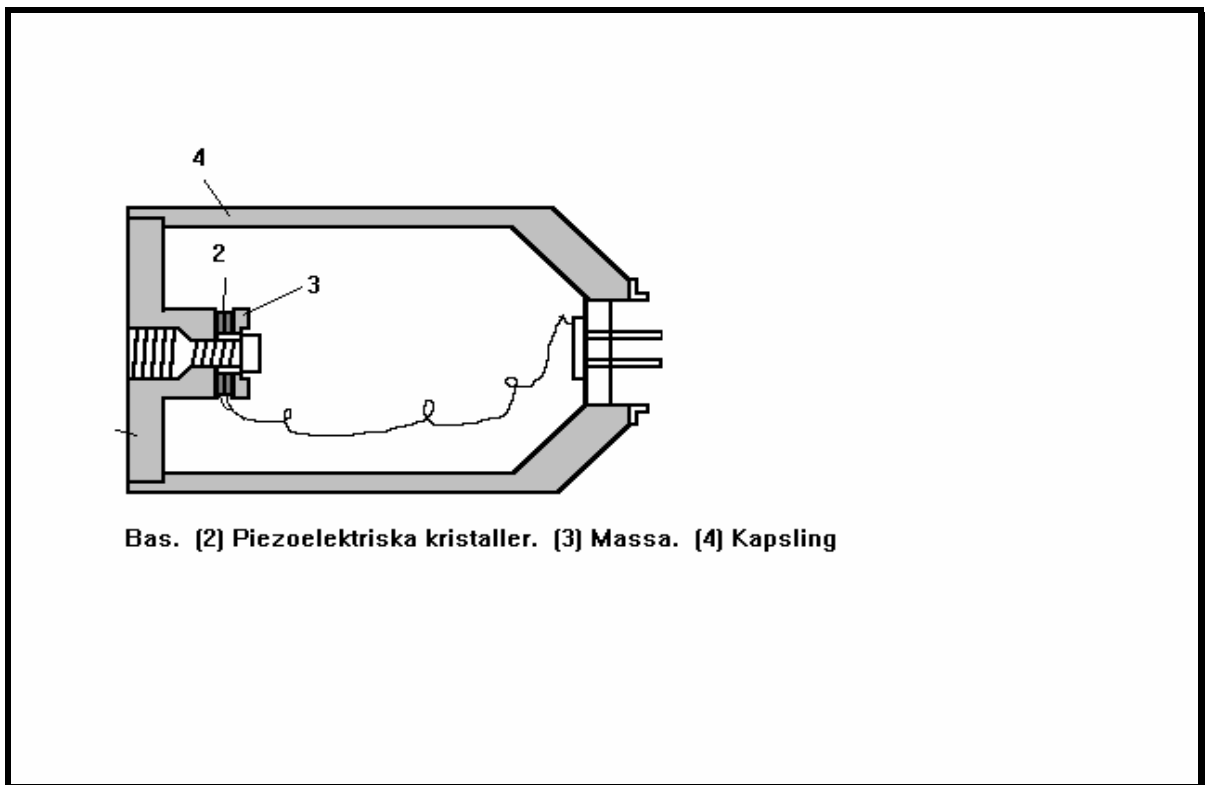


Figur 5. Undersökt maskinsystem

MÄTSYSTEMET

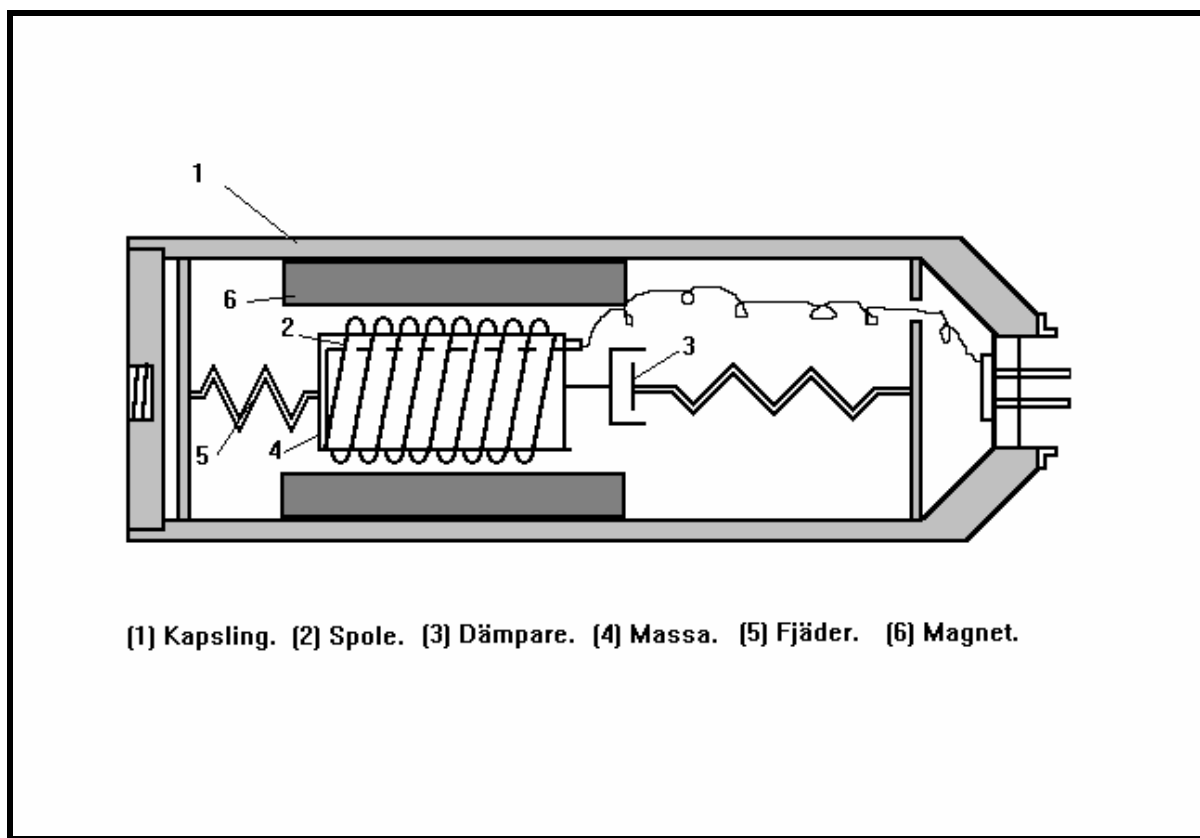
Mätsystemet som Högskolan i Karlstad ställde till mitt förfogande kom från Orbit Monitoring. Mätsystemet en **Trendmaster 2000** som är tillverkat av **BENTLY NEVADA**. **BENTLY NEVADA** är ett världsledande företag inom maskinövervakning. Givarna är fyra stycken till antalet. Tre stycken accelerometrar monterade på kylkompressorn som är den vanligaste typen av givare för vibrationsövervakning, och en stycken hastighetsgivare monterad på ram.

En accelerometer består av en eller flera piezoelektriska kristaller (se 5), när den utsätts för en kraft ger den elektrisk laddning som är mätbar och mäts i $[mm/s^2]$. Typiskt frekvensområde ligger mellan 120 - 600 000 r/min. Fördeklar är att den har ett relativt stort frekvens, och amplitudområde, ringa storlek, låg vikt, tål värme och att det inte finns rörliga delar i en accelerometer vilket gör den tålig.. De är monterad i axiell led, radiellt vertikalt och radiellt horisontellt.



Figur 6. Accelerometer

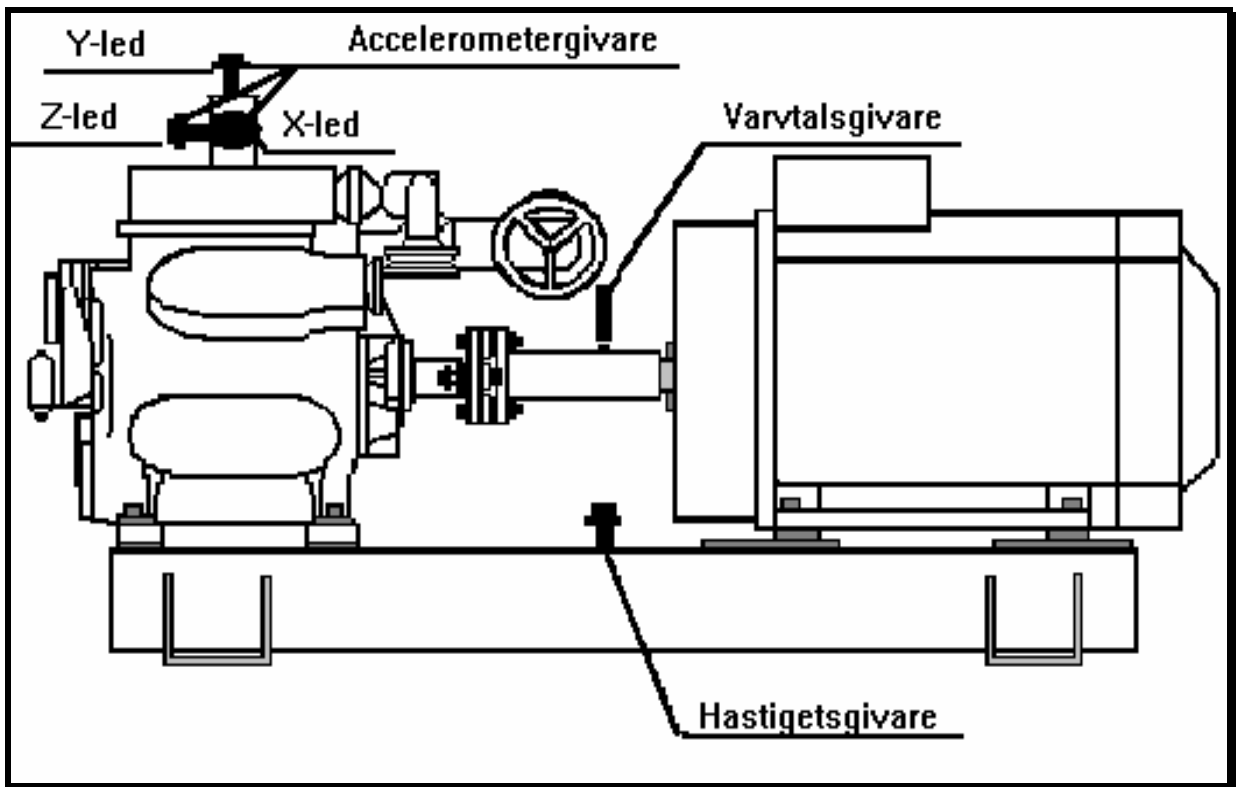
Dessutom finns det en "hastighetsgivare" monterad på ramverket (se 6), hastighetsgivaren är betydligt känsligare än accelerometern eftersom den innehåller rörliga delar, den består av en kärna som är seismiskt upphängd emedan spolen är fixerad till givarens bas. Då givaren utsätts för vibrationer ger den en utsignal som är proportionell mot vibrationshastigheten, v [mm/s]. Typiskt frekvensområdet ligger mellan 600 - 60 000 r/min.



Figur 7. Hastighetsgivare

GIVAR PLACERING

Givarnas placering på maskinsystemet framgår av 7, placeringen av accelerometrarna uppe på toppen av en av cylinderbankarna är inte den fördelaktigaste, men i brist på alternativ så fick det duga. Det optimala placeringen är annars i närheten av lagren för axlar eftersom det oftast är lagren eller axelns vibrationer man vill analysera. Hastighetsgivarens placering på ramen vilket kompressor och elmotor var monterade på var en bra placering för jämförande mätning av elmotor och kompressor



Figur 8. Givar placering

MÄTVÄRDEN FRÅN SYSTEMET

	Acc 1 X-led	Acc 2 Y-led	Acc 3 Z-led	Hast 1 Ram
r/min	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s
1470	2,65	4,35	1,98	4,28
2940	2,41	0,44	0,82	0,85
4410	0,68	0,07	0,63	0,12
5880	0,75	0,34	0,62	0,38
7350	1,13	1,26	0,87	0,69
8820	0,38	0,39	0,58	0,18
10290	0,73	0,08	0,39	0,25
11760	0,56	0,17	0,43	0,68
13230	0,30	0,15	0,15	0,16
14700	0,74	0,42	0,58	0,14
16170	0,61	0,65	2,28	0,42
17640	1,22	1,28	3,62	0,24
19110	0,31	0,39	0,35	0,33
20580	0,19	0,18	0,28	0,18

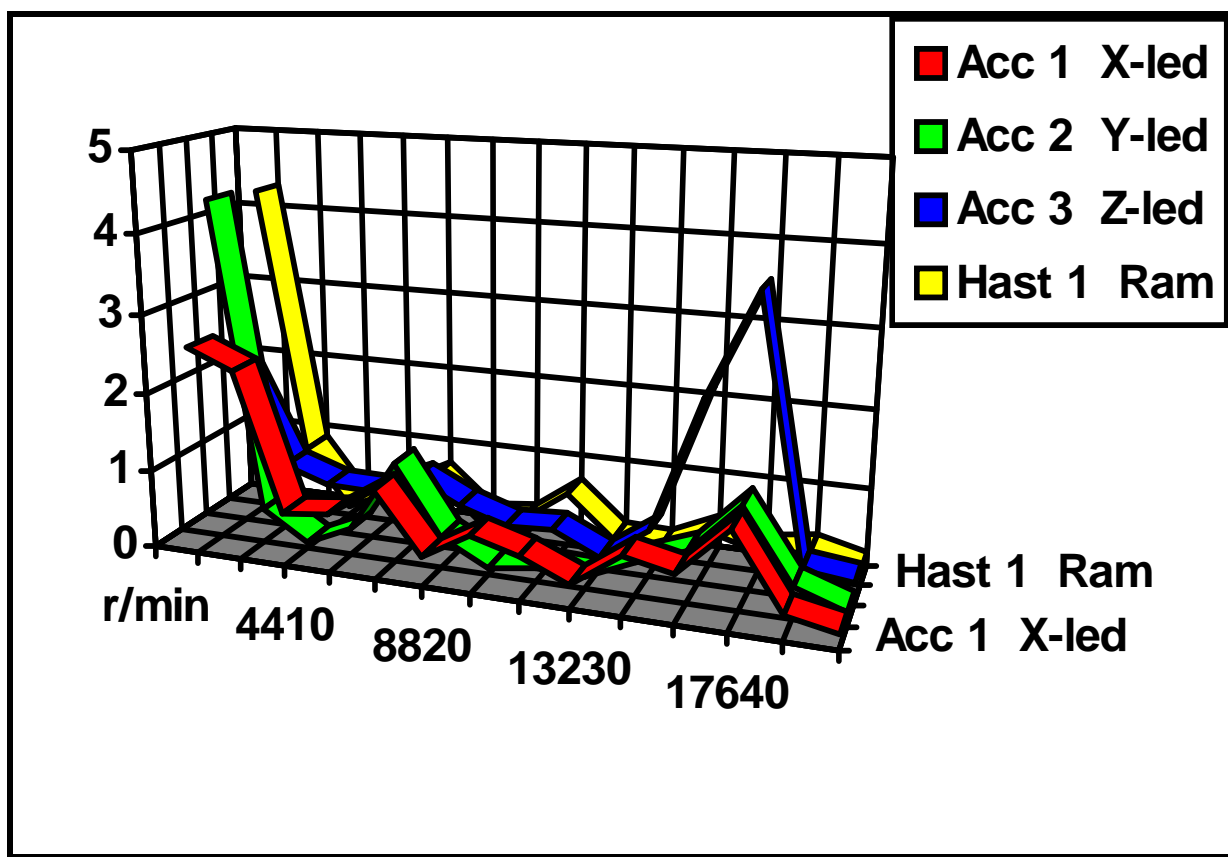
Tabell 2. Mätvärden från systemet

ANALYSEN

DETEKTFREKVENSER

Vid analysen av uppsamlad data kan man se att de största detektfrekvenser finns vid:

1. X-led (radiell, horisontell led): 1470, 2940, 7350, 17640 r/min
2. Y-led (radiell, vertikal led): 1470, 7350, 17640 r/min
3. Z-led (axiell): 1470, 7350, 16280, 17750, r/min
4. RAM: 1470 r/min



Figur 9. Detektfrekvenser

TREND MÄTNING

Analysering har pågått en allt för kort tid för att någon trendutveckling ska kunna säkerställas med hjälp av uppmätta data. Vid trendmätning så måste tiden vara avsevärt längre än de få veckor som undersökningen pågått, uppskattningsvis ska tiden för trendmätning vara 1/2 år till 1 år lång period med kontinuerligt insamlande av mätuppgifter från de olika mätpunkterna.

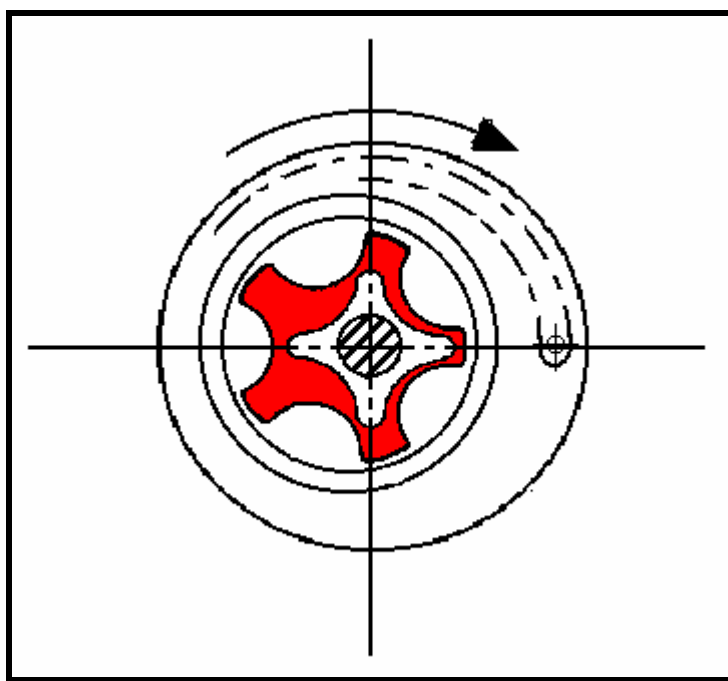
UPPHOV TILL DETEKTFREKVENSER

AXELVARVTALET

Detektfrekvensen vid maskinens varvtal dvs. 1470 r/min, som dominerar i y-led (radiellt, vertikalt), kan vara en följd av från obalans, böjd axel, feluppriktning, elektriskt fel, excentriskt fel eller skevhet i roterande komponent. Eftersom det saknas en topp vid dubbla varvtalet i axiell riktning så kan böjd axel vid kopplingen och vinkelfel i uppriktningen uteslutas. Även obalans kan utaslutas eftersom amplituden i radiell riktning är mindre än den axiella. De två detektfrekvenserna i X-led 1470 och 2940 r/min med den dominerande detektfrekvensen 1470 r/min tyder på ett parallell fel i uppriktningen mellan elmotor och kompressor. Det kan också finnas lösa delar som kan orsaka detektfrekvensen vid dubbla varvtalet. Elektriskt fel kan ej utredas på grund av att mätutrustningen ej kan mäta kontinuerligt utan mätsystemet för samman data och presenterar den som ett fotografi av händelsen.

5 x VARVTALET

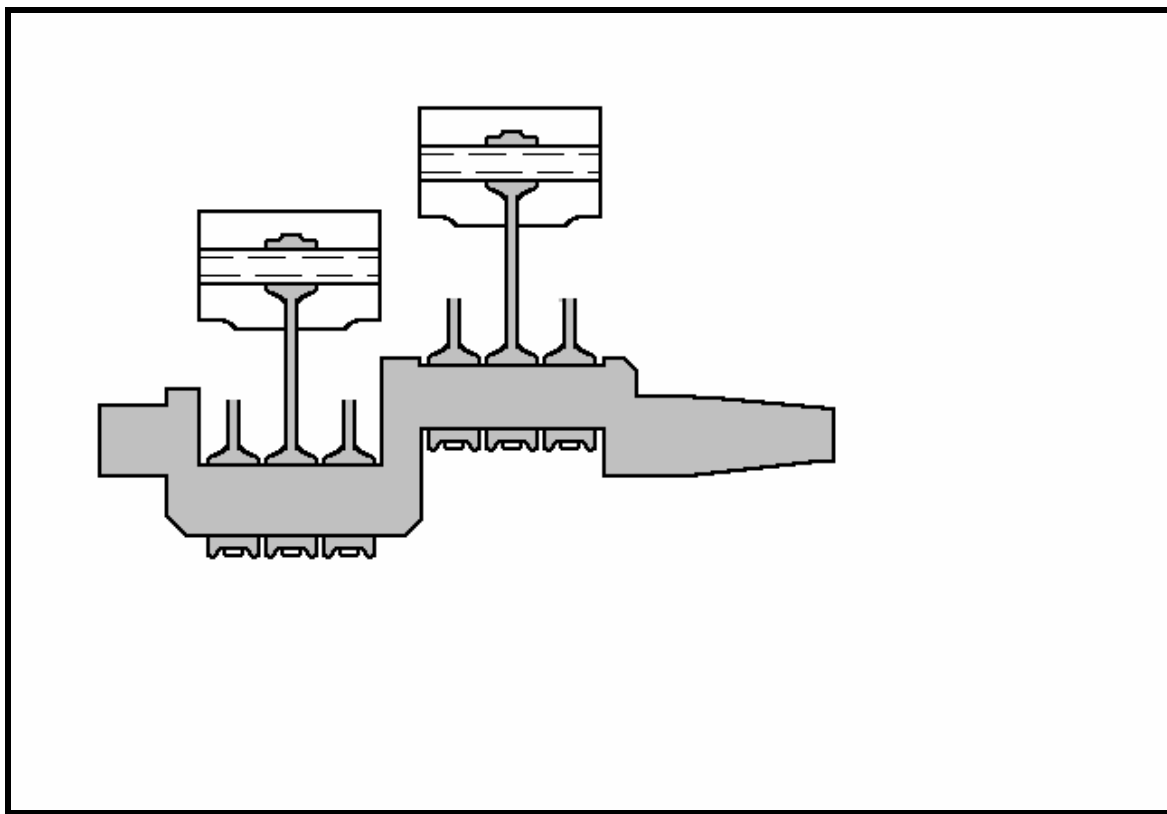
Detektfrekvensen vid fem gånger varvtalet 7350 r/min har sitt ursprung hos oljepumpen. Olje pumpen är en excenterringspump. Innerrotorn har fyra kuggar är monterad på pumpaxeln och driver i sin tur ytterrotorn som är utförd med fem kuggluckor. Eftersom oljepumpen är direktkopplad på vevaxelns förlängning så får den 1470 r/min i varvtal. För varje varv som kompressoraxeln roterar griper innerrotorn fem gånger i ytterrotorn. $5 \times 1470 = 7350$.



Figur 10. Oljepump

12 x VARVTALET

Detektfrekvensen vid 17640 r/min har sitt ursprung från kolvarna. Vid division av 17640 med 12 som är det antal stötar som 6 kolvarna ger ifrån sig per varv så får man 1470. Kolvarna ger ifrån sig två stötar per varv som kompressoraxeln roterar.



Figur 11. Vevparti

DISKUSSION

MÄTMETOD

Mätmetoden med en vibrationsmätutrustning som var inkopplad en tid på kylmaskinen är relativt avancerad, det finns enklare instrument för vibrationsanalys.

Vid vibrationsanalys med permanent inkopplade dataloggers ger följande fördelar : (1) Inkopplingen är exakt den samma hela tiden. (2) Eliminering av den mänskliga faktorn vid uppmätningen. (3) Analyseringen av mätdata är enklare. (4) Miljön vid analysarbetet kan göras betydligt trivsammare i ett anpassat utrymme. (5) Vid ett stort antal av mätpunkter är det snabbare , vilket innebär en lägre kostnad per mätning.

Fördelarna med handhållna vibrationsinstrument som tas ut till de olika mätobjekten för insamling av vibrationsdata är: (1) De är smidigare vid hantering. (2) När mätobjekten är relativt få till antalet, eller vid stor spridning av dessa så blir kostnaden för utrustningen lägre. (3) Vid analyseringen kan närheten till mätobjektet vara en stor fördel (möjlighet för analys vid mätpunkten).

Monteringspunkten för accelerometrarna var inte den bästa tänkbara , det hade varit bättre om den kunde varit närmare vevaxeln. Även en till uppsättning av accelerometrar monterad på elmotorn hade varit bra för bättre ur jämförelse aspekten mellan elmotor och kylkompressor.

Vid "kritiska" anläggningar så kopplas dessa i allt större omfattning till datorer för att de lättare ska kunna kontrolleras angående temperaturer, tryck, flöden, varvtal, etc. vid sådana uppkoppling så skulle vibrationsanalys vara bra för att säkrare kunna planera underhållet på dessa.

SLUTSATSER

För att kunna minska underhållskostnaderna för maskiner med roterande delar behövs det ett vibrationsbaserat övervakningsprogram som tydligt kan fastställa felorsakerna. Det gäller inte bara obalans, böjda axlar och uppriktningsfel utan också lagerfel, kugghjulsfel, kavitationer och el-motorfel.

Jag har med hjälp av vibrationskurvor framtagna med hjälp av dataloggern kunna säkerställa varifrån detektfrekvenser har sitt ursprung och därmed fått bekräftat att vibrationsanalys kan bli ett bra komplement för underhåll av kylkompressorer i framtiden.

Vibrationsanalys på större direktkopplade kylkompressorer med flexibla kopplingar är ett bra komplement till de periodiska kontroller som dessa får varje år. Vid dessa kontroller så tas det diverse prov, det kontrolleras angående läckage och prestanda från dessa.

Slutsatsen av försöket med vibrationsanalys på en kylkompressor blir den att, analys av vibrationer är möjlig att utföra på en kylkompressor med fram och återgående kolvar, och det på ett bra och effektivt sätt.

REFERENSER

Lindley, R Higgins.: Maintenance engineering handbook. McGraw-Hill book company. USA, 1988

SKF, Utbildning/presentation.: Basic vibration analysis

Skogindustrins anläggningstekniska samlingsgrupp.: Norm SSG 3030, 1990.

Idhammar underhåll.: Produktivt underhåll. Södertälje juli 1992

Björk, Karl.: Hållfasthets lära. Ågrens Tryckeri AB. Örnköldsvik 1988.

Björk, Karl.: Mekanik. Ågrens Tryckeri AB. Örnköldsvik 1990.

Newland, De.: Mechanical vibration analysis and computation. Longman Scientific & Technical, New York, 1988.

Brennert, Sven.: Materiallära. Karlebo förlag AB. Stockholm 1989

Nakajima, Seiichi.: TPM, introduktion till TPM. Tryckeri Balder AB, Stockholm 1992

Bently, Nevada.: Applications note, Predictive maintenance through the monitoring and diagnostics of rolling element bearings. Bently nevada Corporation 1989

Bently, Nevada.: Orbit, Monitoring reciprocating compressors Vol. 11, No.3. Bently nevada Corporation december 1990.