

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta

Katedra fyziky

Měření na soustrojí turbína – generátor vodní elektrárny

(Testing Measurement at the System Turbine – Generator of the Water
Power Station)

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph.D.
ČESKÉ BUDĚJOVICE 2009

autor: Brožek Evžen

Anotace

Tato práce popisuje celky a jednotlivá zařízení na vodní elektrárně. U jednotlivých celků je vysvětlen princip a význam pro celé soustrojí. Dále se tato práce zabývá účelem a problematikou základního měření vibrací, které pro vodní elektrárny mají své specifické charakteristiky a vypovídají o stavu ložisek a sestavy celého soustrojí. Na základě tohoto měření a jeho historie lze v předstihu diagnostikovat druh a charakter chyby, která z vibrací vyplývá.

Abstract

This theses describes units and particular machines in the water powerstation in Kamýk. As for the particular units their principle and importance for the whole machine set are explained. Moreover my theses deals with the aim and issues of basic vibration measurements which are of specific importace for water powerstations because they inform about the state of bearings and about the condition of the whole machine set. On the basis of these measurements and their history it is possible to diagnose in advance the type and character of a mistake which results from the vibrations.

Prohlášení:

Prohlašuji, že předloženou práci jsem vypracoval samostatně, pouze s použitím uvedené literatury.

Prohlašuji, že v souladu s par. 47 b zákona č. 111/1998 Sb. V platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách.

V Solenicích, 20. listopadu 2008

.....
Evžen Brožek

Poděkování:

Děkuji Z. Saturkovi za umožnění zpracování této práce a P. Suchanovi za spolupráci při měření.

Obsah:

1	Úvod a cíle práce [1].....	7
2	Seznámení s elektrárnou a turbogenerátorem.....	7
2.1	Základní parametry.....	8
2.2	Vtokový a výtokový objekt.....	8
2.2.1	Rychlozávěry.....	8
2.3	Turbína a vnitřní příslušenství.....	10
2.3.1	Oběžné kolo.....	11
2.3.2	Rozvaděč.....	12
2.3.3	Uhlíková ucpávka.....	13
2.3.4	Vyčerpání prosáklé vody.....	13
2.3.5	Vodící ložisko turbíny.....	14
2.3.6	Vyčerpání prosáklého oleje.....	14
2.3.7	Rozdělovací hlava.....	14
2.4	Budič.....	15
2.4.1	Odbuzovač.....	15
2.4.2	Elektrické brždění.....	15
2.5	Hydrogenerátor.....	15
2.5.1	Rotor hydrogenerátoru.....	17
2.5.2	Stator hydrogenerátoru.....	18
2.5.3	Závěsné ložisko, dolní a horní vodící ložisko.....	20
2.5.4	Chlazení hydrogenerátoru.....	22
2.6	Zařízení VN, VVN a NN.....	22
2.6.1	Rozvodna 123 kV.....	22
2.6.2	Blokové transformátory.....	23
2.6.3	Rozvodna 12 kV.....	24
2.6.4	Transformátory vlastní spotřeby.....	25
2.6.5	Rozvodna NN.....	25
2.7	Systém SKŘ.....	26
2.8	Ostatní zařízení.....	27
2.8.1	Dieselagregát.....	27
2.8.2	Staniční akumulátorové baterie, střídač.....	27
2.8.3	EPS - elektrická požární signalizace.....	28
2.8.4	Vyčerpávání prosáklé vody elektrárny.....	29
3	Měření chvění.....	30
3.1	Všeobecné požadavky vibrodiagnostiky.....	30
3.1.1	Základní požadavky.....	30
3.2	Popis zařízení.....	31
3.2.1	Fyzikální vlivy snímačů dráhy.....	35
3.2.2	Bezdotykový snímač dráhy.....	36
3.2.3	Funkce systému a jeho vazba na ŘS.....	39
3.2.4	Rozlišení chvění.....	41
3.2.5	Druhy vibrací vyskytujících se u vodních turbín.....	44
3.2.6	Vlastní měření vibrací, výsledky.....	45
3.3	Další měření prováděné na systému.....	49
3.3.1	Proudění vody.....	49
3.3.2	Měření průtoku.....	50
4	Závěr.....	52

Použité zkratky

ČAR	čerpací agregát regulátoru
ČARZ	čerpací agregát rychlozávěru
D-EVD	dispečink vodních elektráren
DLK	dolní lopatkový kruh
DVLG	dolní vodící ložisko generátoru
EB	elektrické brždění
EPS	elektrická požární signalizace
HLK	horní lopatkový kruh
HVLG	horní vodící ložisko generátoru
OK	oběžné kolo
OL	lopata OK
P	výkon činný
PV	prosáklá voda elektrárny
Q	výkon jalový
R (12 kV, 123 kV)	rozvodna (velikost napětí)
RK	rozdávěcí ústrojí; rozvaděč
RL	rozdávěcí lopatka
RZ	rychlozávěr
ŘS	řídící systém
SKŘ	systém kontroly a řízení
TS	staniční transformátor
VLT	vodící ložisko turbíny
ZL	závěsné ložisko

1 Úvod a cíle práce [1]

Elektrárna Kamýk je součástí Vltavské kaskády umístěná na 134,73 říčním kilometru. Její nádrž o délce 10 km navazuje na vývar elektrárny Orlík. Celkový objem nádrže 12,8 mil. m³ slouží především pro vyrovnání kolísavého odtoku ze špičkové elektrárny Orlík. Provoz je dálkově řízen z centrálního dispečinku Vltavské kaskády ve Štěchovicích.

Vybudována byla letech 1957 - 62. Betonová přehrada gravitačního typu je vysoká od základu až po korunu hráze 24,5 m a dlouhá 158 m. Ve strojovně, která se nachází na levém břehu Vltavy elektrárny o rozměrech 15 x 85 m a výšce 12 m, jsou instalována 4 soustrojí s Kaplanovými turbínami a potřebným elektrotechnickým zařízením nazývaným pomocné pohony, které zajišťují podpůrné služby pro vlastní soustrojí. Elektrárna je nízkotlaká, přehradová, vyrovnávací, pološpičková s celkovým vodním objemem 12,8 mil.m³, z čehož energeticky využitelný objem je 4,65 mil. m³. Výroba el. energie v denní špičce je v součinnosti s elektrárnou Orlík. Průměrné provozní hodiny za měsíc jsou cca 200 hodin. Roční průměr vyrobené elektrické energie se pohybuje kolem 72 662 MWh.

Cílem práce je seznámení se soustrojím, popis postupů měření na zařízení vodní elektrárny. Podrobný popis způsobu a významu základního vibrodiagnostického měření, které se provádí na jednotlivých soustrojích. Hlavním cílem práce je provedení dílčích měření vibrací a jejich následné vyhodnocení.

2 Seznámení s elektrárnou a turbogenerátorem

V následujícím textu bude stručně popsána vodní elektrárna [1] jako celek a jednotlivě si přiblížíme základní celky zařízení turbogenerátoru (viz. obr. 1, řez vodní elektrárnou Kamýk). Detailní popis nelze běžně uveřejňovat, proto jsou zde uváděny jen celky, který jsou pro popis a pochopení funkce nezbytné. Ze začátku bude uveden popis elektrárny a potom podrobně popíši jednotlivé celky včetně vzájemných závislostí jednotlivých celků.

Zařízení, které je nainstalované na jiných vodních elektrárnách, je principiálně podobné, liší se pouze v parametrech jednotlivých zařízení.

2.1 Základní parametry

Ve strojovně vodní elektrárny Kamýk jsou instalována 4 soustrojí s Kaplanovými turbínami a potřebným elektrotechnickým zařízením (pomocné pohony) [1]. Rozdíl mezi horní a dolní hladinou jezer (spád) se pohybuje v rozmezí 12 až 15,5 metrů. Maximální hlnost jedné turbíny je $90 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Vyvedení výkonu z generátoru je v prvním suterénu přes rozvodnu 12 kV, odkud je zajištěn i přívod pro vlastní napájení. Vlastní spotřebou se rozumí zajištění el. energie pro chod vlastní elektrárny, provozních budov a hlavně navazujících pomocných pohonů, které zajišťují chod turbíny. Ke strojovně vodní elektrárny je připojena venkovní rozvodna R 123 kV o jmenovitém napětí 110 kV. V prostoru venkovní rozvodny jsou dva blokové transformátory o výkonu 25 MVA. Transformátory zajišťují transformaci napětí z generátoru na napětí sítě (10,5/110 kV). Jeden transformátor je společný pro vyvedení výkonu ze dvou generátorů. Základní jednopólové schéma viz příloha č.1.

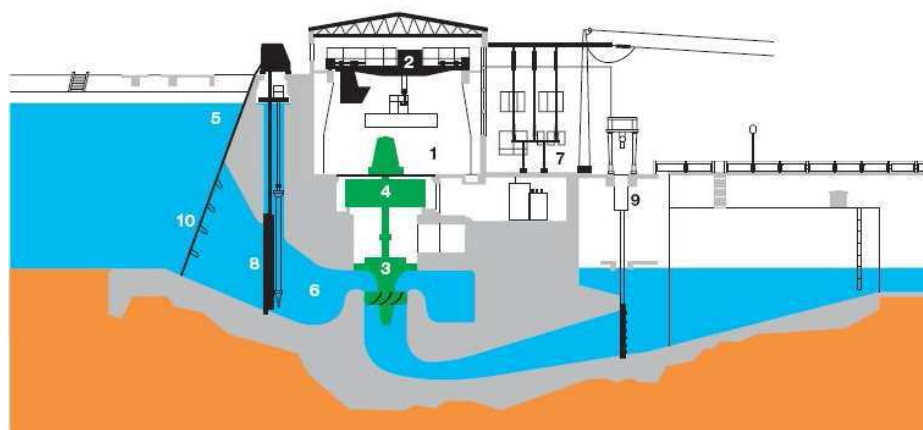
2.2 Vtokový a výtokový objekt

Prostory, kterými vstupuje voda pro turbíny do hráze, se nazývají vtoky. Vtoky tvoří 8 samostatných vtoků. Jsou vždy dva pro jednu turbínu, přičemž se po průchodu přes česle a rychlozávěř spojí v jeden přivaděč. V prostoru horního předprsí se pohybuje portálový jeřáb. Jeho hlavním účelem je hrazení vtoků, opravy rychlouzávěřů včetně drobných oprav zařízení v jeho pracovním prostoru. Vstupní část je vytvořena jako monolitická železobetonová konstrukce včetně spirály až po předrozvaděcí lopaty, které jsou vetknuty do dolního a horního lopatkového kruhu. Následují rozváděcí lopaty, které navádějí vodu na oběžné kolo v daném směru. Pod dolním lopatkovým kruhem je komora oběžného kola, na níž přímo navazuje savka, která má opět monolitickou železobetonovou konstrukci až po výtok z turbíny, který je opatřen hrazením savky. Prostor výtoku je opět opatřen jeřábem, který slouží jen pro účely hrazení.

2.2.1 Rychlozávěře

Rychlozávěře se nacházejí ve vtokovém prostoru stejně jako česle, které jsou umístěny před RZ. Úkolem česlic je zachycení velkých těles, jako jsou stromy, větve, uhynulá zvíř. Rychlozávěře slouží pro rychlé uzavření přítoku vody na turbínu v případě

havárie, poruchy, poruchy regulace nebo řídicího systému. Zvedání RZ probíhá hydraulicky. Celá konstrukce je složena z čerpacího agregátu s rozvodným zařízením, servomotoru, závěsu zvedacího mechanismu a vypínacího zařízení. Pístnice je pevně spojena s tabulí rychlozávěru a je plněna pomocí čerpacího agregátu přes pístní tyč. Zvedání rychlozávěru se provádí přečerpaním oleje ve válci zpod pístu nad píst servomotoru. Uzavírání vodních cest se provádí vlastní vahou rychlozávěru. Rychlost uzavírání průtokových cest rychlozávěry je daná množstvím přepuštěného oleje z válce přes clony v servomotoru. V dolní poloze dochází k většímu zaškrcení průtoku, aby se ztlumil dopad rychlozávěru na dosedací práh a nedošlo k poškození rychlozávěrové tabule. Váha rychlozávěru zaručuje i při proudící vodě bezpečné uzavření vtoku na turbínu. Impuls pro shození rychlozávěru a uzavření průtokových cest většinou vydává vlastní řídicí systém dle druhu poruchy systémem „A“ nebo „B“. V případě ohrožení nebo poruchy řídicího systému je možné vyslat impuls na „shození“ rychlozávěru z operátorského pracoviště nebo tlačítkem „nebezpečí“ u každého stroje, který přestaví havarijní magneventil do polohy „zavírá“. Po dosednutí tabule na práh vtoku zajede, magnetická clona na horním víku servomotoru ke snímači polohy „ rychlozávěr dole“ a signalizuje polohu rychlozávěrové tabule. Při havarijním odstavení stroje dochází povel od poruchového relé na „provozní“ systém „A“ a současně na „havarijní“ systém „B“ magneventil, který je napájen ze staniční akumulátorové baterie pro případ ztráty napětí.



- | | |
|-----------------------------|-------------------|
| 1-Strojovna | 6-Přivaděč |
| 2-Jeřáb | 7-Rozvodna |
| 3-Kaplanova turbína | 8-Rychlozávěr |
| 4-Generátor | 9-Hradidla výtoku |
| 5-Max. úroveň horní hladiny | 10-Česle |

Obr. 1 Řez vodní elektrárnou Kamýk, převzato a upraveno [1]

2.3 Turbína a vnitřní příslušenství

Turbína na elektrárně Kamýk je vertikální pravotočivá pod hydrogenerátorem, přímo spojená svislým hřídelem s HG. Typ Kaplan s regulačním oběžným kolem. Nastavení lopat se provádí pomocí kříže, který je spojen přes páky s OL. Samotná turbína se otáčí v nerezové komoře mezi betonovou spirálou, která navazuje na přivaděč, a kašnou s betonovou sací troubou - savkou. Technické údaje turbíny viz tab. 1. Turbína je přímo spojena svislým hřídelem s hydrogenerátorem.

Tab. 1 Technické údaje turbíny, převzato z [1]

turbína: typ Kaplan	4 K 69
jmenovité hodnoty	
spád turbíny	15,5 m
objemový průtok	90 m ³ /s
výkon	12 100 kW
otáčky	150 min ⁻¹
mezní hodnoty:	
maximální spád ¹	15,5 m
minimální spád	10,0 m
maximální hlnost v rozmezí spádů (10 až 15,5) m	96,3 m ³ /s
výkon při maximálním spádu	12,1MW
průběžné otáčky soustrojí	350 min ⁻¹
minimální sací výška	-1 m
oběžné kolo:	
jmenovitý průměr OK	3 800 mm
počet oběžných lopatek	4
průměr náboje OK	1 520 mm (40 %)
hmotnost OK	22 300 kg
kóta osy oběžných lopatek	268,00
rozdávěcí ústrojí:	
počet rozváděcích lopatek	24
výška rozvaděče	1 560 mm
roztečný průměr čepů RL	4 560 mm
kóta osy rozváděcích lopatek	269,69

¹ Při zaklesnutí nádrže Slapy může hrubý spád činit až 16 m.

2.3.1 Oběžné kolo

Oběžné kolo, obr. 2, odebírá protékající vodě její energii, přenáší ji přes hřídel na rotor hydrogenerátoru, kde se mění pohybová energie vody na energii elektrickou. Oběžné kolo je osazeno 4 ks nerezových lopat, které jsou zhotoveny z ušlechtilé nerezové oceli, dobře odolné vůči korozi a kavitaci. I přesto ke kavitaci dochází (viz. kapitola 3.2.1. Proudění vody). Natáčení oběžných lopat během provozu je automatické, dle spádu a požadovaného výkonu tak, aby účinnost turbíny byla optimální. Pohyb respektive nastavení OL se provádí pomocí servomotoru oběžného kola, který je umístěn v horní části náboje oběžného kola. Servomotor oběžného kola se skládá z válce a pístu opatřeného pístními kroužky. Do servomotoru se přes hřídel celého stroje přivádí tlakový olej z regulátoru, který obsahuje 6000 litrů regulačního oleje.



Obr. 2 Oběžné kolo, foto autor

Mechanismus pro natáčení lopat v OK je pod pístem servomotoru přímo spojený s pístem servomotoru. Skládá se z klik, naklínovaných na čepech lopatek, táhel a přestavného kříže. Při pohybu pístu servomotoru nahoru se OL oběžného kola zavírají a naopak. Náboj oběžného kola je naplněn olejem pro mazání výše uvedených mechanismů pro nastavování oběžných lopat.

2.3.2 Rozvaděč

Přes 24 ks rozváděcích lopat proudí voda na oběžné kolo. Rozváděcí lopaty usměrňují průtok vody z betonové spirály OL a regulují tím průtok vody přes turbínu. Rozváděcí kolo se skládá z natáčivých rozváděcích lopat (obr. 3 Turbínová šachta, usazování rozváděcích lopat), které jsou uloženy v bezmazných pouzdrech. Pouzdra jsou vsazena do horního a spodního lopatkového kruhu. Na horním lopatkovém kruhu je uložen regulační kruh, který je pospojován pomocí pák a táhel s horním čepem RL. Pomocí dvou servomotorů a tlakového oleje se provádí otáčení regulačního kruhu, který přes mechanismus nastavuje otevření rozváděcích lopat. Táhlo servomotoru je jedním pohyblivým koncem uloženo v pístu servomotoru a je kryto tzv. ochrannou trubkou, která vytváří povrch pístu v pístnici a zároveň slouží pro zajištění polohy v uzavřeném stavu rozváděcího kola.



Obr. 3 Turbínová šachta, usazování rozváděcích lopat, foto autor

Druhý konec táhla je uchycen pomocí čepu v uchu regulačního kruhu a tím může vykonávat kruhový pohyb souhlasný s natáčením regulačního kruhu. Rozváděcí ústrojí je první částí, která uzavírá vodu na oběžné kolo turbíny. V zavřené poloze rozváděcích lopat má tlak vody snahu otevírat RL, proto je jeden ze servomotorů opatřen blokovacími kolíky, které blokují rozváděcí lopaty proti samovolnému otevření. Blokovací kolíky jsou umístěny na víku servomotoru rozváděcího kola a jeho hlavní

částí je čep, který mechanicky zajistí ochrannou trubku servomotoru v zavřené poloze. Miniaturní průsaky kolem čepů RL jsou svedeny do prosáklé vody elektrárny. Tady je voda přečištěna pomocí odlučovačů oleje a čerpána zpět do vodního toku.

2.3.3 Uhlíková ucpávka

Ve spodní části turbínového víka těsně nad labyrintem je umístěna uhlíková ucpávka turbínového hřídele. Tento prvek zamezuje pronikání vody kolem hřídele do víka turbíny. Ucpávka se skládá z nerezového dvoudílného nosného článku, na kterém jsou přišroubovány kruhy nerezových článků. Uvnitř každého článku jsou umístěny uhlíkové kroužky, které se skládají z 12 uhlíkových a 12 mosazných přitlačných segmentů. Na uhlíkové kroužky dosedají mosazné kroužky, které jsou pomocí nerezových pružin přitlačovány na nerezové pouzdro nasazené ze dvou částí na hřídeli, čímž zabraňují pronikání vody do tělesa víka. Aby nedocházelo k přehřívání a vydírání pouzdra, je uhlíková ucpávka chlazena pomocí vody přivedenou potrubím od filtru chladící vody. Pro zamezení překročení kritické teploty jsou z uhlíkové ucpávky vytaženy do ŘS dva odporové teploměry Pt 100, kde je softwarově ošetřeno překročení teploty.

2.3.4 Vyčerpání prosáklé vody

Voda prosáklá přes uhlíkovou ucpávku se vyčerpává pomocí dvou elektrických čerpadel s nezávislou automatikou na ŘS. Priorita nebo-li volba čerpadel lze nezávisle měnit. Celá automatika je založena na dvou na sobě nezávislých plovácích, které jsou osazeny stavitelnými indukčními snímači. Zvýší-li se hladina prosáklé vody v tělese víka, snímač dá povel k zapnutí prvního čerpadla. Pokud voda stoupá dále, ať už vlivem poruchy nebo nedostatečného výkonu prvního čerpadla, dochází k hlášení do ŘS „ZVÝŠENÁ HLADINA PV“ a současně se zapne i druhé čerpadlo. Když i při chodu obou čerpadel voda stoupá, je do ŘS přenesen signál „KRITICKÁ HLADINA PV“ která vyvolá poruchový stav soustrojí. Dojde k odstavení stroje a přivolání obsluhy. Pomocí bezkontaktního snímače se řeší i vypínání obou čerpadel při minimální hladině vody. Výpadky jističů motorů a napájení místní automatiky je signalizován řídicím systémem.

2.3.5 Vodicí ložisko turbíny

Nad uhlíkovou ucpávkou je ve vlastním tělese turbínového bloku umístěno vodicí ložisko turbínového hřídele (VLT). Ložisko se skládá ze segmentů nebo půlené ložiskové pánve (dle soustrojí). Segmenty jsou uloženy v olejové lázni. Ložisko je mazané pomocí nuceného oběhu a olej v ložisku je chlazen pomocí prosáklé vody turbíny. Stav hladiny oleje se kontroluje plovákovým zařízením se snímači maximální a minimální hladiny s výstupem do poruchové signalizace řídicího systému.

2.3.6 Vyčerpání prosáklého oleje

V prostoru víka se nachází i sběrná nádoba na prosáklý regulační olej. Sem je sveden prosáklý olej ze servomotorů rozváděcího kola, oběžného kola a blokování. Z nádrže se olej vyčerpává dvěma čerpadly, obdobné jako čerpání prosáklé vody turbíny. Zvýší-li se hladina prosáklého oleje, bezkontaktní snímač dá povel přes řídicí systém k zapnutí prvního čerpadla. Pokud hladina oleje stoupá dále, ať už vlivem poruchy nebo nedostatečného výkonu prvního čerpadla, dochází k hlášení do ŘS „ZVÝŠENÁ HLADINA OLEJE“ a současně se zapne i druhé čerpadlo. Pomocí bezkontaktního snímače je řešeno vypínání obou čerpadel při minimální hladině oleje. Výpadek jističů motorů je signalizován v řídicím systému.

2.3.7 Rozdělovací hlava

Rozdělovací hlava je umístěna na nejvyšším místě celého soustrojí. Je nad hlavním budičem a má dva prostory, otevírací a zavírací. Oba prostory jsou od sebe konstrukčně oddělené. Otevírací strana rozdělovací hlavy je vymezena trubkou a vrtáním hřídele. Tímto prostorem přivádí tlakový regulační olej nad píst. Zavírací strana spojuje vnitřní trubkou prostor pod pístem servomotoru oběžného kola. Do rozdělovací hlavy se tlakový olej přivádí dvěma přívodními trubkami z pultu regulátoru od rozvodného šoupátka oběžného kola, které přepouští olej dle automatiky a nastavené kulisy nad píst nebo pod píst servomotoru oběžného kola, tím mění polohu oběžných lopat, neboli otvírá a zavírá OK.

2.4 Budič

V horní části budiče je umístěno sběrací ústrojí kotvy budiče (komutátor) a sběrací kroužky, přes které se převádí napětí na rotorové cívky hydrogenerátoru. Hlavní budič je umístěn na společné hřídeli generátoru pod sběracím ústrojím v prostoru strojovny. Dodává stejnosměrné budící napětí přes odbuzovač do cívek rotoru hydrogenerátoru. Buzení hlavního budiče je řízeno regulátorem napětí, který je umístěn v R 12 kV.

2.4.1 Odbuzovač

Odbuzovač se používá při odstavování stroje. Slouží pro rychlé odbuzení generátoru v případě poruch nebo elektrických ochran. Při rychlém vypnutí odpojí cívky rotoru hydrogenerátoru od hlavního budiče, připojí je k odbuzovacímu odporu, ve kterém se rychle spotřebuje elektrická energie rotoru, a tím dojde k rychlému snížení výkonu na nulu již odpojeného stroje.

2.4.2 Elektrické brždění

Elektrické brždění vykonává pomocný budič a slouží pro elektrické brždění stroje. Skládá se z dynama, které pohání 3f elektromotor. Při odstavování stroje se po vypnutí výkonového vypínače, přepnutí odbuzovače a sepnutí krátkospojky (vyzkratování statoru hydrogenerátoru) uvede do činnosti elektrické brždění (budí cívky rotoru nastaveným napětím). Tím dojde k nabuzení rotoru, ale protože je stator zkratován, elektromagnetické pole vyvolá brzdící účinek, vzrostou brzdící síly. Elektrické brždění uvede rychle soustrojí do klidu při normálním, poruchovém nebo havarijním odstavení až do úplného zastavení stroje, pokud se porucha netýká zemního spojení generátoru. Jakmile se stroj zastaví, uvedou se v činnost mechanické brzdy, které zajišťují stroj před samovolným roztočením. Po dobu elektrického brždění jsou některé ochrany generátoru blokovány.

2.5 Hydrogenerátor

Hydrogenerátor [1] je synchronní, vertikální, trojfázový hydroalternátor uzavřeného provedení se zapojením do hvězdy, s vlastní cirkulací chladícího vzduchu a vodícím ložiskem nad a pod rotorem. Parametry generátoru viz tab. 2. Pracuje na napětí 10,5 kV o maximálním činném výkonu 10 MW. Generátor je spojen s turbínou pevnou spojkou

[2]. Radiálně je rotor veden dvěma vodicími ložisky, rotující části soustrojí (rotor, hřídel a oběžné kolo turbíny) jsou zavěšeny na axiálním závěsném ložisku umístěném hned pod generátorem.

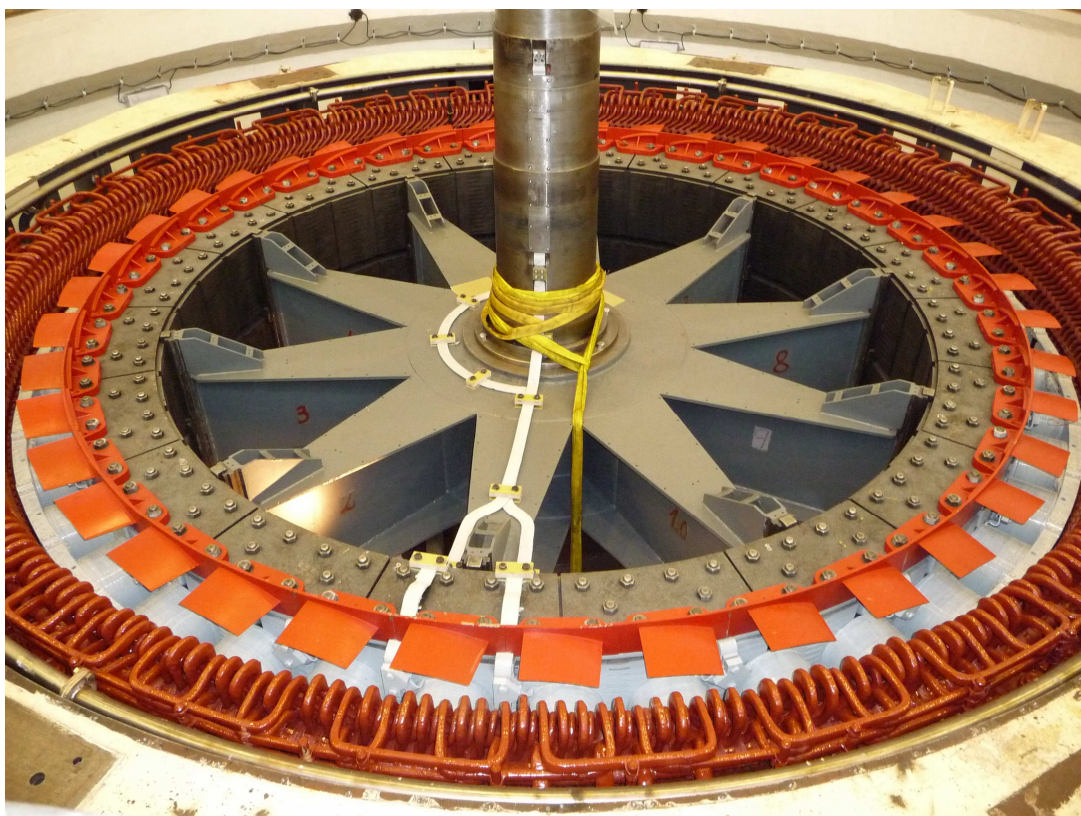
Generátor je při pohledu shora pravotočivý a je vybaven zařízením pro temperování strojovny a zařízením pro hašení vlastního vinutí vodou. Měření elektrických veličin, proud, napětí, frekvence, činný a jalový výkon, [3, 4] je vytaženo do ŘS, kde jsou data dále zpracovávána pro regulaci výkonu, frekvence, napětí aj. Funkce a význam ŘS bude probrán v samostatné kapitole. Řez soustrojím viz příloha č.2

Tab. 2 Parametry generátoru, převzato z [1]

hydroalternátor: typ	HV 8060/40
zdánlivý výkon	12 500 kVA
činný výkon	10 000 kW
jmenovité napětí	10 500 V
jmenovitý proud I_{tn}	688 A
jmenovitý účinník $\cos \varphi$	0,8
jmenovité otáčky	150 min^{-1}
průběžné otáčky	360 min^{-1}
moment setrvačnosti	1 260 tm^2
třída izolace	B/B
stator:	
napětí statoru U_{tn}	10 5000 3 (1 ± 5 %) V
spojení fází	Y
počet vyvedených konců	6
rotor:	
jmenovité budicí napětí rotoru	(55 až 146) V
jmenovitý budicí napětí proud	(160 až 372) A
reaktance stroje:	
synchronní (nenasycený stav)	125 %
prvá přechodová (transientní)	32 %
druhá přechodová (subtransientní)	21 %
ztráty:	
v mědi statoru Z_{Cu}	157 kW
v železe Z_{Fe}	93 kW
mechanické	103 kW
způsob chlazení	vzduchem
způsob hašení	vodou
způsob brzdění	elektrické + mechanické

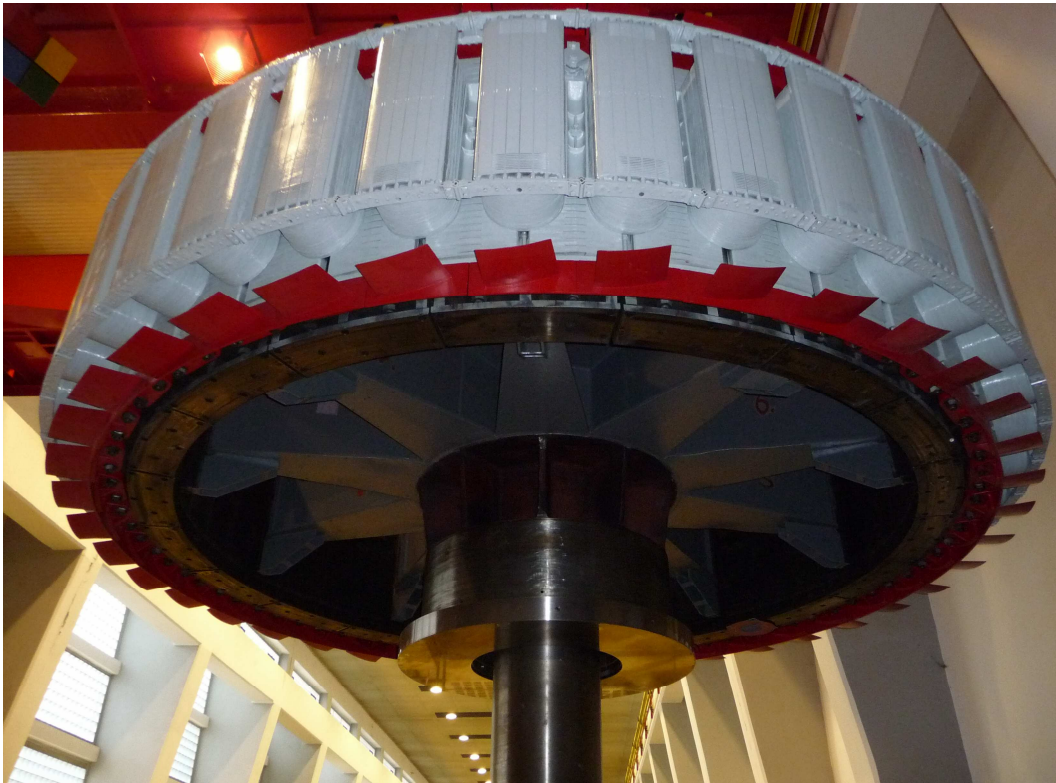
2.5.1 Rotor hydrogenerátoru

Rotor je proveden jako skládaný. Věnc rotoru je složen z ražených ocelových plechů stažených velkým počtem svorníků. Věnc je držen na deseti ramenech rotorové hvězdy svařené z ocelových plechů s nábojem z lité oceli. Náboj rotoru je nasazen na generátorový hřídel, kde je zajištěn, krouticí moment přenáší jedno pero. Technické údaje rotoru viz tab. 3. Celý věnc je axiálně rozdělen na dva bloky, mezi nimiž je kanál pro vzduch. Na obou stranách jsou umístěny radiální ventilátory. Brzdová dráha je uchycena na spodní straně věnce rotoru. Předpětí ve věnci za klidu je docíleno mohutnými klíny, kterými je věnc na ramenech rozepřen. Obvod rotoru je osazen 40ks pólů, na kterých jsou navinuty cívky, které vytvářejí magnetický obvod generátoru (obr. 4 Sestava statoru a rotoru, obr. 5 Rotor).



Obr. 4 Sestava statoru a rotoru, foto autor

Cívka je dostatečně dimenzována proti účinkům odstředivých sil a konstrukce spojení pólu s věncem rotoru umožňuje snadnou montáž a demontáž pólu bez vyjmutí rotoru ze stroje. Horní a dolní strana rotoru je osazena axiálními ventilátory, které vhánějí vzduch do čel statorového vinutí. Rotor je veden dvěma vodicími ložisky.



Obr. 5 Rotor, foto autor

Tab. 3 Technické údaje rotoru, převzato z [1]

vnější průměr	5 136 mm
výška vč. ventilátorů	1 350 mm
počet pólů	40 mm
celková hmotnost s vinutím	80 874 kg

2.5.2 Stator hydrogenerátoru

Vinutí statoru je trojfázové spojené do hvězdy. Vytvořeno je z cívek (obr. 6 Pospojování cívek vinutí generátoru, 7 Kompletní vinutí generátoru, 8 Převoz statoru), uložené v otevřených drážkách, konce vinutí jsou vyvedeny ze statoru. Vinutí statoru je trojfázové, spojené do hvězdy. Vyvedeny jsou tři vývody fází a tři vývody spojené do nuly. Parametry viz tab. 4. Aktivní železo je složeno z dynamových plechů tl. 0,5 mm oboustranně lakovaných. Je složeno z ražených vzájemně překládaných plechů vedených pravítky ve tvaru rybiny. Pomocí ventilačních vložek jsou vytvořeny ventilační kanály, jimiž proudí chladicí vzduch, který má ochlazovat vinutí. Čela vinutí jsou zajištěna proti silám vznikajícím při zkratu zděřemi přichycenými ke kostře.

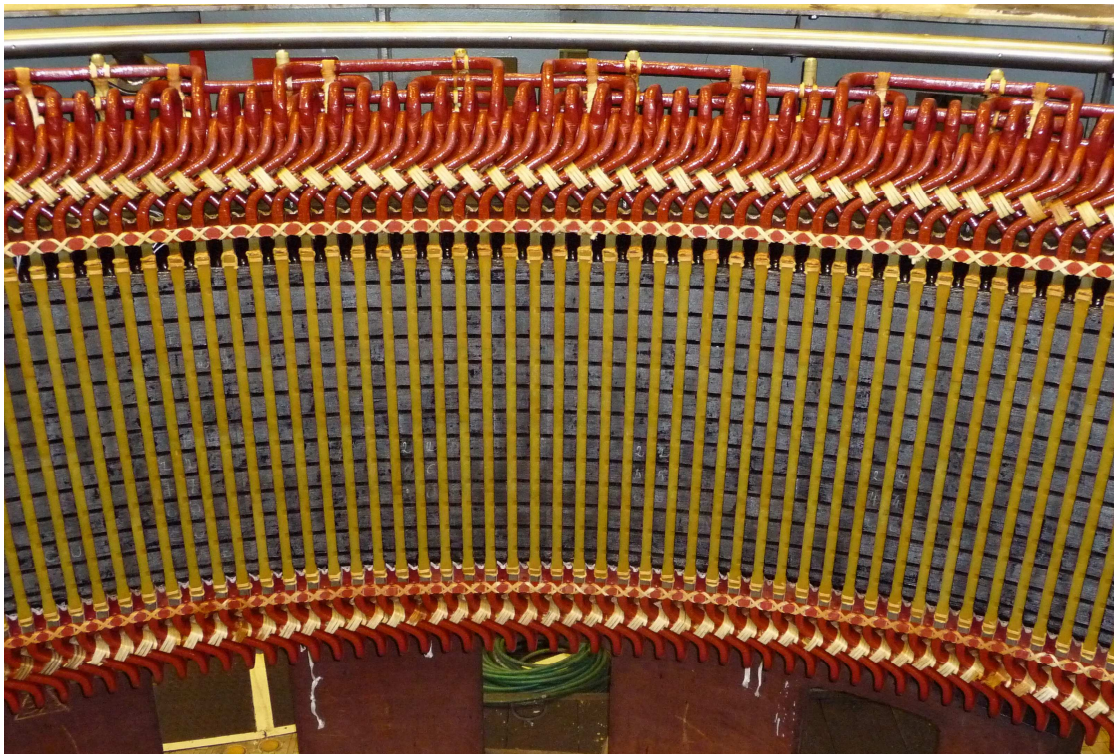


Obr. 6 Pospojování cívek vinutí generátoru, foto autor

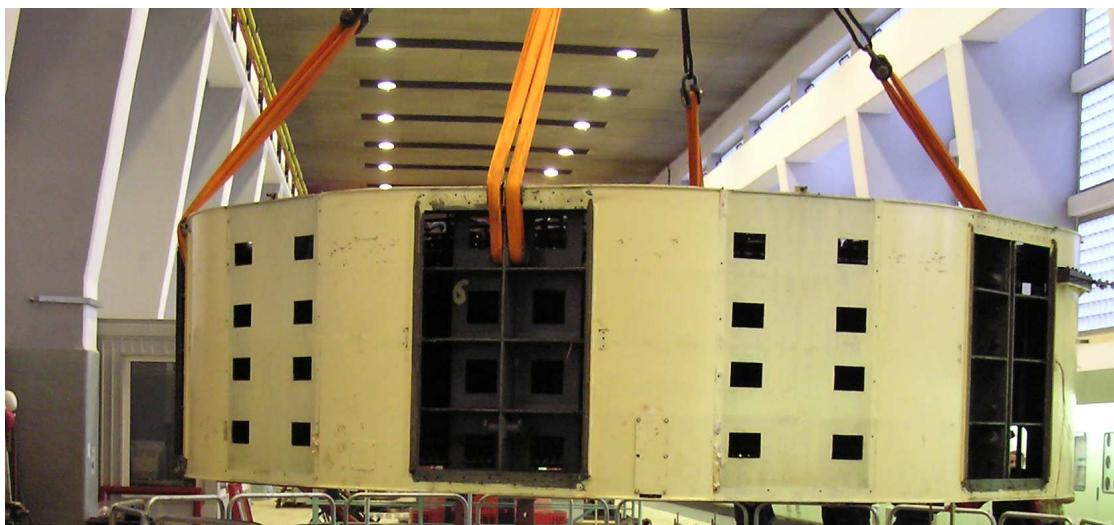
Pro kontrolu oteplení plechů, vinutí a vzduchu jsou zamontovány odporové teploměry Pt 100, jejichž výstup je zaveden do řídicího systému. Tyče jsou izolovány asfaltovou izolací teplotní třídy B, pouze TG 3 je nově převinuta do teplotní třídy F. Na obvodu statoru jsou namontovány chladiče a výfuky vzduchu do strojovny uzavíratelné elektricky ovládanými klapkami.

Tab. 4 Technické údaje statoru, převzato z [1]

vnější průměr	asi 6 900 mm
vnitřní průměr	5 150 mm
výška	1 840 mm
výška jha	800 mm
počet drážek	312
celková hmotnost kostry s vinutím	35 900 kg



Obr. 7 Kompletní vinutí generátoru, foto autor



Obr. 8 Převoz statoru, foto autor

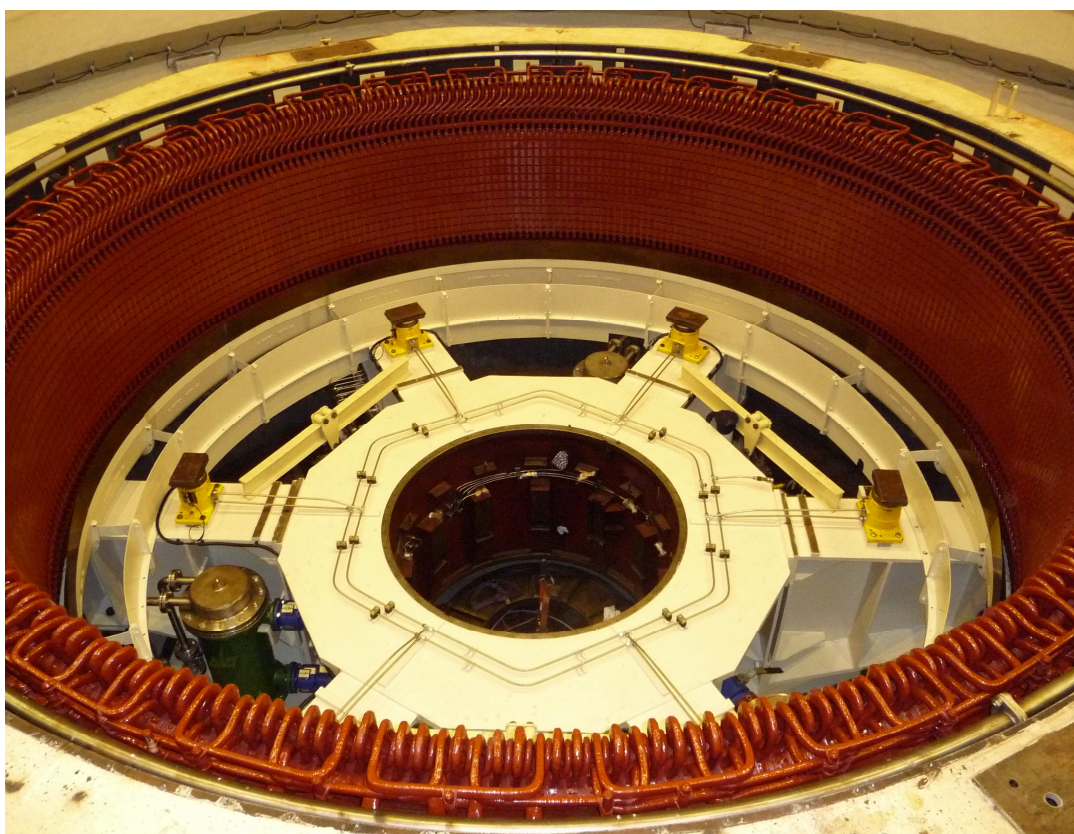
2.5.3 Závěsné ložisko, dolní a horní vodící ložisko

Hmotnost rotoru alternátoru, turbíny a tlak vody jsou zachyceny v nosném neboli závěsném ložisku (ZL). Technické parametry ZL viz tab. 5. Horní vodící ložisko generátoru je umístěno nad rotorem, dolní vodící ložisko generátoru (DVLG) pod rotorem generátoru kombinované spolu s ZL (viz obr. 9 Závěsné ložisko, brzdy, stator

generátoru). Obě ložiska jsou segmentová s kompozicovou výstelkou a jsou uložena v olejové lázni.

Tab. 5 Technické údaje ZL, převzato z [1]

	<i>TG1, TG2 a TG3</i>	<i>TG4</i>
jmenovitá únosnost ložiska	2 900 kN	
počet segmentů	12	6
vnější/vnitřní průměr kluzné plochy ložiska	1500 mm / 820 mm	
obvodová rychlost na středním průměru segmentů	9,11 m/s	
střední měrný tlak v kluzné ploše segmentu	0,594 MPa	1,188 MPa
hmotnost jednoho segmentu s výstelkou	76,5 kg	



Obr. 9 Závěsné ložisko, brzdy, stator generátoru, foto autor

Úkolem DVLG a HVLG je zachycení radiální odstředivé síly od nevyvážky a magnetického tahu rotoru generátoru. Teploty segmentů jsou sledovány odporovými a kapilárními teploměry, které jsou zabudovány i v lázni (nádrži) obou ložisek. Množství olejové náplně je snímáno plovákem s indukčními snímači. Chlazení horního vodícího ložiska generátoru (HVLG) je prováděno vodou pomocí chladiče

umístěné v olejové lázni. Chlazení DVLG je prováděno rovněž vodou, ale olej je vyveden z nádoby do zavěšených chladičů vedle ložiska.

2.5.4 Chlazení hydrogenerátoru

Chlazení generátoru se provádí vzduchem, který dodávají lopatky umístěné po obou stranách rotorového kola. Vzduch je rozveden kryty vinutí a vzdušnými kanály tak, že ochlazuje póly rotoru, čela vinutí a jeho statoru. Oteplený vzduch vstupuje do chladičů připevněných na obvodu kostry statoru. Ochlazený se rozvádí v šachtě generátoru a vrací se horní a spodní hvězdou do rotoru. Chladícím médiem je voda zbavená hrubých nečistot. Provádí se měření teplého a studeného vzduchu a dále měření vstupní a výstupní vody přivedené do chladiče pro určení účinnosti chlazení. Udržování teploty generátoru zajišťuje systém regulace chlazení generátoru. Ohřátý teplý vzduch se v zimním období využívá pro temperování strojovny.

2.6 Zařízení VN, VVN a NN

2.6.1 Rozvodna 123 kV

Rozvodna je venkovního provedení, umístěna na plošině nad rozvodnou 12 kV, přisazená k povodní straně budovy strojovny. Od ostatního prostoru je oddělena ochranným oplocením. Rozvodna 123 kV je spojena do „H“ se dvěma vývody a s jedním odpojovačem ve spojce přípojníc. Řešena je jako dvě pole obsahující vždy jeden blokový transformátor a vývod do venkovního systému 110 kV. Slouží pro vyvedení výkonu elektrárny do systému 110 kV elektrizační soustavy. Systém přípojníc rozvodny, do které soustrojí elektrárny pracují přes dva blokové transformátory, je podélně dělený spojkou sběren. Měřicí transformátory, kterými jsou vývody osazeny, provádí měření napětí, proudu a frekvence. Měřené veličiny jsou zavedeny do řídicího systému a elektroměrů určených pro měření výroby.

Rozvodna 123 kV je vybavena:

- trojpólovými vypínači
- trojpólovými odpojovači s uzemňovačem
- blokovými transformátory
- kombinovanými měřicími transformátory napětí a proudu venkovního provedení izolované plynem SF6

- ovládacími skříněmi

Všechny ovládané prvky můžeme ovládat místně a dálkově. Sledování veličin z měření je možné ze strojovny, dozorny elektrárny a navíc vývody linek i z ústředního dispečinku přenosové soustavy. Jakékoliv nestandardní stavy jako ztráta napájecího napětí, působení elektrických ochran a další poruchové stavy jsou signalizovaný do řídicího systému.

2.6.2 Blokové transformátory

Blokové transformátory, jak už bylo zmíněno, se nacházejí v R 123 kV a jsou třífázové. Používají se pro transformaci vyrobené elektrické energie 10,5/110 kV. Každý blokový transformátor vyvádí výkon ze dvou hydrogenerátorů. Technické parametry viz tab. 6. Stanoviště transformátorů jsou v zastřešených stanovištích prostoru rozvodny 123 kV vybavených havarijními izolovanými jímkami, které jsou schopny pojmout celou olejovou náplň blokových transformátorů.

Blokové transformátory jsou vybaveny:

- plynovým relé (Bucholtz)
- olejoznakem na dilatační nádobě (konzervátoru)
- pojistným tlakovým ventilem
- termostatem
- odporovým teploměrem
- ventilátory odfuků

Výstupy z těchto členů, měření teploty, popudy a působení plynových relé jsou zavedeny do řídicího systému.

Tab. 6 Technické údaje blokových transformátorů, převzato z [1]

	47BAT80	48BAT80
typ	E 31 M-0	1 EH 32 M-0
jmenovitý trvalý výkon	25 000 kVA	31 500 kVA
převodový poměr	121 kV / 10,5 kV	
primární vinutí:		
napětí	(121 000 ± 2x2,5 %) V	(121 000 ± 5 %) V
proud	119 A	150 A
sekundární vinutí:		
napětí	10 500 V	
proud	1 375 A	1 732 A
jmenovitý kmitočet	50 Hz	
počet fází	3	
spojení fází	YNd1	
chlazení	ONAN/ONAF	
druh zatížení	S1	
třída izolace	A	
napětí nakrátko u_k	10,6 %	9,6 %
ztráty naprázdno	15,1 kW	(48,5 ± 15 %) kW
ztráty nakrátko	108,9 kW	(175 ± 15 %) kW
průchodky:		
121 kV: 1U, 1V, 1W	Kvp 123/630	
121 kV: 1N	Kvp 38,5/250	DT 45f/400
10,5 kV: 2U, 2V, 2W	DT 10f/3000	DT 10f/3000
celková hmotnost	39 240 kg	60 750 kg
hmotnost oleje	7 850 kg	14 840 kg
hmotnost aktivních částí	20 570 kg	

2.6.3 Rozvodna 12 kV

Rozvodna 12 kv se nachází v podlaží generátorů pod rozvodnou 123 kV. Rozvodna je jednoprostorová s jedním systémem přípojníc. Do rozvodny jsou přivedeny vývody z generátorů a z ní se napájí transformátory vlastní spotřeby. Je zde také připojen VN kabel z elektrárny Orlík, který slouží obousměrně pro napájení vlastní rozvodny nebo lze z rozvodny napájet vlastní spotřebu elektrárny Orlík zejména při výpadku vlastních zdrojů.

Rozvodna je vybavena:

- vakuovými vypínači
- odpojovači
- měřicími transformátory napětí a proudu
- příslušenstvím generátorů - odbuzovač, odbuzovací odpor a pod.
- ovládacími skříněmi

Všechny prvky v rozvodně je možné ovládat dálkově a sledovat jejich stav. Některé prvky jsou ovládány automaticky řídicím systémem. Jedná se o systém záskoků při najíždění a odstavení turbosoustrojí a při ztrátě vlastní spotřeby.

2.6.4 Transformátory vlastní spotřeby

Tyto transformátory slouží k zajištění vlastní spotřeby elektrárny. Jeden transformátor je regulační (TS2), je napájen z R 12 kV, a dva transformátory jsou neregulační (TS1,3). Neregulační transformátory se připojují automaticky při najíždění soustrojí a provádějí tzv. záskok vlastní spotřeby, kdy se energie pro spotřebu pomocných pohonů odebírá přímo z vlastní výroby. TS1 je společná pro stroje TG1, TG2 a TS3 je společná pro TG3, TG4. V případě poruchy transformátoru jednoho z transformátorů lze vlastní spotřebu jednotlivých strojů převádět a kombinovat z TS2 v rozvodně NN.

2.6.5 Rozvodna NN

Rozvodna NN je umístěna vedle rozvodny 12 kV a zajišťuje napájení pro chod pomocných pohonů. Napájení této rozvodny je z transformátorů vlastní spotřeby TS1 až TS3. Hlavní rozvaděč je panelového provedení, rozdělený do sekcí s možností propojení podélnými spojkami sběren. Za klidu soustrojí jsou spojky sběren propojeny a veškerá vlastní spotřeba je napájena ze střední sekce, která je napájena z TS2. Krajiní sekce jsou za provozu soustrojí napájeny z transformátorů vlastní spotřeby TS1, TS3 a slouží pro napájení sběrnice „A“ strojových rozvaděčů. Střední sekce napájí vlastní spotřebu strojové rozvaděče po sběrnici „B“ všech soustrojí a všechny podružné rozvaděče elektrárny.

Přístrojové vybavení rozvaděče:

- vypínače kombinované s jističi,
- měřicí transformátory,
- pojistkové odpínače, popř. kloubové vypínače.

Ovládání prvků rozvodny je za běžného provozu automatické, ale lze ovládat dálkově nebo ručně. Výstupy z měřících transformátorů jsou zavedeny do řídicího systému.

2.7 Systém SKŘ

Řízení elektrárny je řešeno jako plně automatizovaný systém, jehož základním provozním režimem je dálkové ovládání provozu z D-EVD nevyžadující trvalou přítomnost či zásahy obsluhy. Systém zajišťuje funkce připojení, sběru, zpracování a prezentace informací z technologie [5]. Jednotlivé funkce jsou realizovány jednou či více částmi systému, který je koncipován jako distribuovaný, pracující na řadě prostředků, propojených vzájemně komunikačním systémem pro přenos informací a řízení. Obslužný personál využívá pouze zobrazovací systém, který zprostředkovává styk s ostatními částmi systému. Pro místní ovládání řídicího systému elektrárny, sledování celkového provozního stavu elektrárny a řešení mimořádných situací je určeno stanoviště operátora ve strojovně elektrárny. Pro místní ovládání zařízení jednotlivých soustrojí a jejich pomocného zařízení a rozveden jsou v polích manipulačních rozvaděčů v protivodní stěně strojovny instalována místní ovládací pracoviště. Pro styk mezi obsluhou a nadřazeným řídicím a informačním systémem elektrárny slouží hlavní operátorské pracoviště informačního a řídicího systému. Na technologických schématech, tabulkách a grafech zobrazovaných na displejích systému je znázorňován okamžitý stav technologie i jeho historie. Pomocí systému obsluha zadává řídicímu systému příkazy. Systém se ovládá pomocí klávesnice a kulového ovladače.

Systém kontroly a řízení elektrárny sestává hierarchicky ze dvou relativně samostatných úrovní:

- z procesní úrovně
- z úrovně vizualizační.

Páteří systému je lokální optická sběrnice, do které se paprskovitě připojují jednotlivé komponenty systému (procesní stanice, operátorské stanice). První přerušení optické sítě je signalizováno, teprve druhé přerušení sběrnice by vedlo k ovlivnění provozu na sběrnici. Jednotlivá zařízení a funkční celky elektrárny jsou vybaveny vlastními procesními stanicemi plnícími potřebné funkce jako připojení technologie, ovládání, regulační funkce, sběr a třídění dat, počty sepnutí a provozní hodiny, komunikační

úlohy, archivaci dat atp. Technologie je napojena přes převodní členy (relé, optočleny a měřicí převodníky). Všechny procesní stanice jsou propojeny navzájem a s vizualizační úrovní lokální optickou sítí. Celek tvoří distribuovaný řídicí systém, v němž výpadek jedné komponenty nemá za následek zhroucení celého systému. Vlastní soustrojí jsou řízena procesními stanicemi, které vykonávají potřebné funkce včetně funkcí regulátoru turbíny a synchronizace generátoru. Pro úplný přehled o celé elektrárně a pro obsluhu jejího technologického zařízení slouží na stanovišti operátora pracoviště s řídicími počítači, monitory, klávesnicí a tiskárnami.

2.8 Ostatní zařízení

V této kapitole je popsáno pouze zařízení většího významu. Ostatní zařízení, které zde nebude popsáno, není důležité pro pochopení chodu zařízení na vodní elektrárně, ale mají svůj opodstatněný význam.

2.8.1 Dieselagregát

Agregát je umístěný mimo objekt strojovny na nádvoří. Elektrická centrála záskokového napájení automaticky ovládaná se sestává ze vznětového motoru, alternátoru, doplňující výstroje a rozvaděče. Alternátor elektrocentrály je vybaven bezkontaktním automatickým regulátorem napětí, který samočinně vyrovnává poklesy napětí způsobené změnou zatížení alternátoru. Automatický regulátor napětí je součástí alternátoru. Využívá se především pro obnovu napájení při úplné ztrátě napětí z distribuční soustavy. Při ztrátě může obnovit dodávku el. energie tzv. Blackstart. Při úplném rozpadu sítě je elektrárna schopná přejít na ostrovní provoz, pomocí dieselagregátu obnovit vlastní výrobu a pomocí kabelu VN mezi elektrárnami Orlík, Kamýk obnovit provoz i na vodní elektrárně Orlík. Dieselagregát je spouštěn zcela samočinně při ztrátě a poklesu napětí v síti. Při obnově napětí v síti dojde k zastavení dieselagregátu a přepnutí spotřebičů zpět na síť.

2.8.2 Staniční akumulátorové baterie, střídač

Staniční baterie jsou umístěny v prostoru nazývaném akumulátorovna (II. suterén elektrárny). Dvě baterie jsou základním záložním zdrojem pro systém rozvodu stejnosměrného napětí 220 Vss. Akumulátorovna je sestavena ze dvou místností. V jedné místnosti jsou akumulátorové baterie, v druhé místnosti je vzduchotechnika

baterií spojená s předstíní pro uložení ochranných a pracovních pomůcek, ve které je destilační přístroj a sklad kyselin. Usměrňovač zajišťuje jejich pravidelné dobíjení a zároveň napájí stejnosměrné rozvaděče. Stejnosměrný rozvaděč zajišťuje napájení ŘS systému „B“ a nouzové osvětlení. Střídač zajišťuje nepřerušené napájení zařízení na střídavé napětí během výpadku distribuční soustavy po dobu ztráty vlastního napájení – provedení záskoku nebo start dieselaagregátu.

2.8.3 EPS - elektrická požární signalizace

Pro případ vzniku požáru a pro zamezení jeho rozšíření jsou objekty elektrárny zabezpečeny systémem elektrické požární signalizace (EPS). Při vzniku požáru v prostorách, kde jsou umístěny hlásiče EPS, je požár signalizován pomocí těchto automatických hlásičů požáru, které jsou v provedení optickokouřovém, ionizačním a lineárním a pomocí nasávacího kouřového systému RAS. Požár vzniklý v jiných prostorech, ve kterých nejsou hlásiče osazeny, je signalizován až po vniknutí zplodin hoření do prostor hlídaných automatickými hlásiči nebo systémem RAS. Všechny hlásiče kromě lineárních jsou instalovány na stropy ve svislé poloze. Na únikových cestách jsou umístěny tlačítkové hlásiče požáru, které jsou určeny pro manuální vyhlášení požáru osobou, která zpozoruje vznikající požár. Signály ze všech hlásičů požáru jsou přenášeny do ústředny EPS, kde jsou akusticky a opticky signalizovány. Ústředna je instalována v prostoru strojovny vedle pracoviště operátora. Signály poruchových hlášení z ústředny jsou zavedeny do vizualizační části ŘS, kde jsou kromě zápisu zobrazovány na obrazovce ŘS. Požár je vyhlášen automaticky ústřednou EPS po signalizaci automatického nebo tlačítkového hlásiče požáru včetně systému RAS. Poplach je vyhlášen po iniciaci kteréhokoliv hlásiče vždy pro celý objekt najednou. U vchodových dveří do správní budovy je umístěno obslužné pole požární ochrany. Zařízení EPS je instalováno na všech podlažích objektu elektrárny, provozní budovy a správní budovy a ve vrátnici. Automatické i tlačítkové hlásiče včetně systémů RAS jsou zapojeny do kruhové smyčky, v níž jsou rozmístěny izolátory. Ty při poruše zajistí oddělení skupiny hlásičů, v níž k poruše došlo, a zbylé části vedení jsou pak napájeny samostatně z každé strany. Každý hlásič má svou vlastní adresu, takže je okamžitě identifikovatelné místo poplachu nebo poruchy.

2.8.4 Vyčerpávání prosáklé vody elektrárny

Jímka prosáklé vody elektrárny je v šachtě II. suterénu. Slouží ke shromažďování prosáklé vody z hráze a vody vyčerpané z průsaků přes uhlíkovou ucpávku. Jímka má značnou hloubku, ve které dochází k usazování kalů. Zapínání čerpadel, instalovaných v II. suterénu nad jímkou, provádí vlastní automatika prosáklé vody elektrárny. Prosáklá voda prochází přes odlučovače ropných látek, kde se odloučí oleje a jiné škodlivé látky, a poté se vrací zpět do vodního toku. Z vody, která odtéká zpět do vodního toku, se každý měsíc provádí rozbor, kde musí být splněny jakostní limity a množství vyčerpané vody je omezené krajskou hygienickou stanicí. Poruchy, záskok čerpadel, stavy filtrů v odlučovači jsou signalizovány do řídicího systému obsluhy elektrárny.

3 Měření chvění

3.1 Všeobecné požadavky vibrodiagnostiky

3.1.1 Základní požadavky

Dle normy [5] ČSN ISO 10816-5 [Měření relativních a absolutních hřídelových vibrací u hydraulických soustrojí se provádí s pomocí bezdotykových snímačů. Kluzátka se seismickými snímači nelze obecně použít v důsledku toho, že u pomaloběžných hydraulických strojů, jako jsou vodní turbíny, je požadováno měřicí zařízení s velmi nízkým frekvenčním rozsahem. Pro měření relativních vibrací mají být snímače připevněny přímo na ložiskovou pánev nebo na segment ložiska. Jestliže jsou snímače instalovány na nosnou konstrukci ložiska nebo na ložiskovou skříň, jak je to obvyklé u vertikálních strojů, je nutné věnovat pozornost tomu, aby relativní pohyb mezi ložiskovou pávní nebo segmentem a samotným snímačem byl malý ve srovnání s pohybem hřídele. Pokud tomu tak není, nelze naměřený signál prohlásit za reprezentativní pro relativní pohyb mezi hřídelem a ložiskovou pávní nebo ložiskovým segmentem. Tento požadavek může být ohodnocen pomocí statické analýzy konstrukce nebo pomocí dalších měření, která jsou obvykle obtížně proveditelná a nákladná. Co se týká konstrukcí pro připevnění snímačů, je vhodné, aby nejnižší vlastní frekvence těch vibračních módů, které tvoří významné pohyby v pracovním směru snímačů výchylky hřídele, byla větší než sedminásobek synchronní frekvence otáčení a nemá být celým násobkem synchronní frekvence otáčení. Vždy mají být měřeny absolutní vibrace nosné konstrukce a to pomocí seismických snímačů, které jsou připevněny na nosné konstrukci co nejbližší je to možné ke snímači pohybu hřídele a ve stejném směru měření. Údaje ze seismických snímačů smí být po přepočtu na výchylku použity pro hodnocení absolutní výchylky hřídele.

POZNÁMKA Kromě hřídelových vibrací se často monitorují i vibrace ložiskových podpor. Měření vibrací dolních vodících ložisek vertikálních strojů mohou být však chybně interpretována. Hodnota vibrací, naměřená na ložiskách a jejich podporách, které jsou pevně připevněny k budově, je někdy tvořena hydraulickými silami, které jsou přenášeny přímo z hydraulického stroje přes základ a není tedy vytvářena radiálními vibracemi hřídele.]

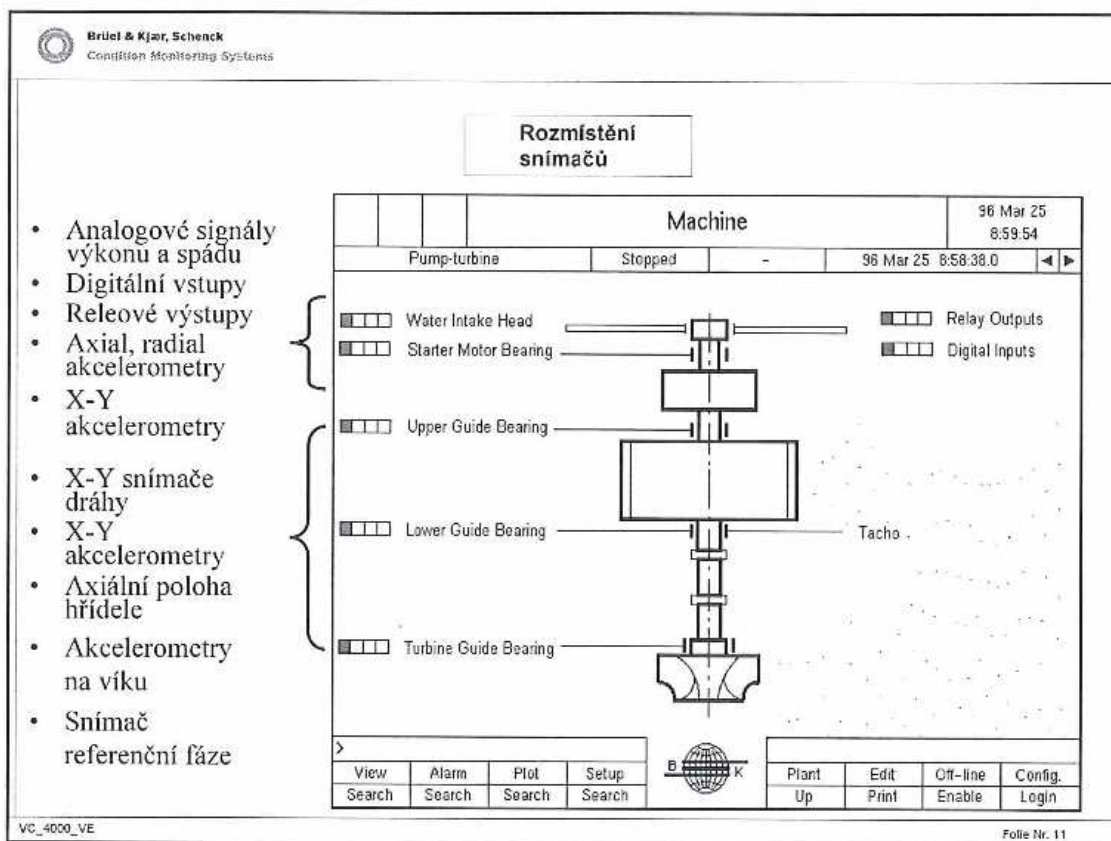
Pro správné měření norma vyžaduje, aby měření byla provedena na všech hlavních ložiskách soustrojí, a pokud je to konstrukčně možné, snímače mají být na různých

ložiskách připevněny v jedné přímce. U vertikálních strojů jsou většinou upřednostňovány směry měření proti směru proudění a o 90° ve směru otáčení hřídele. Axiální měření není předepsáno.

3.2 Popis zařízení

System monitorování vibrací, (VIBROCONTROL 4000[®], výrobce Brüel & Kjær, Schenck[®]) soustrojí slouží pro kontinuální sledování vibračního chování soustrojí, sběr a vyhodnocování dat pro zabezpečení provozu a ukládání získaných dat s možností přenosu do přenosného vibrodiagnostického analyzátoru pro potřeby údržby strojů podle skutečného stavu. Jedná se o samostatné zařízení elektrárny s výstupy jak do procesní úrovně ŘS (signál vyvolávající provozní odstavení soustrojí poruchou), tak do úrovně vizualizační (signalizace stavu systému a výstrah).

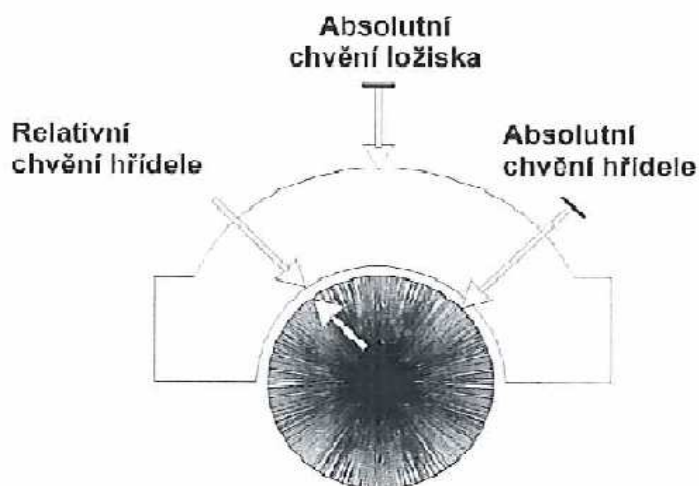
Rozmístění snímačů na stroji obr. 10 a rozmístění snímačů v ložisku obr. 11.



Obr. 10 Rozmístění snímačů na stroji

Zabezpečení a sledování stavu soustrojí systémem monitorování vibrací zahrnuje:

- zachycení aktuálního stavu stroje kontinuálním měřením relevantních stavových provozních parametrů,
- rozpoznání odchylky od žádaného stavu,
- aktivaci alarmu při překročení kritických mezních hodnot,
- odstavení soustrojí při dosažení nebezpečných stavů.



Obr. 11 Rozmístění snímačů v ložisku

Účelem této ochrany, která zabezpečuje soustrojí po strojní stránce, je zabránit provozu soustrojí s nebezpečnou úrovní vibrací; překročení nastavených mezí vede k poruchovému hlášení či odstavení stroje.

Zabezpečovací systém sleduje vibrace ve dvou úrovních:

- základní on-line úroveň osazená monitorem chvění,
- off-line nadstavba s pochůzkovým sběrem dat pro analytické posouzení stavu stroje přenosným vibrodiagnostickým analyzátozem.

Elektrická nezávislost je zajištěna těmito opatřeními:

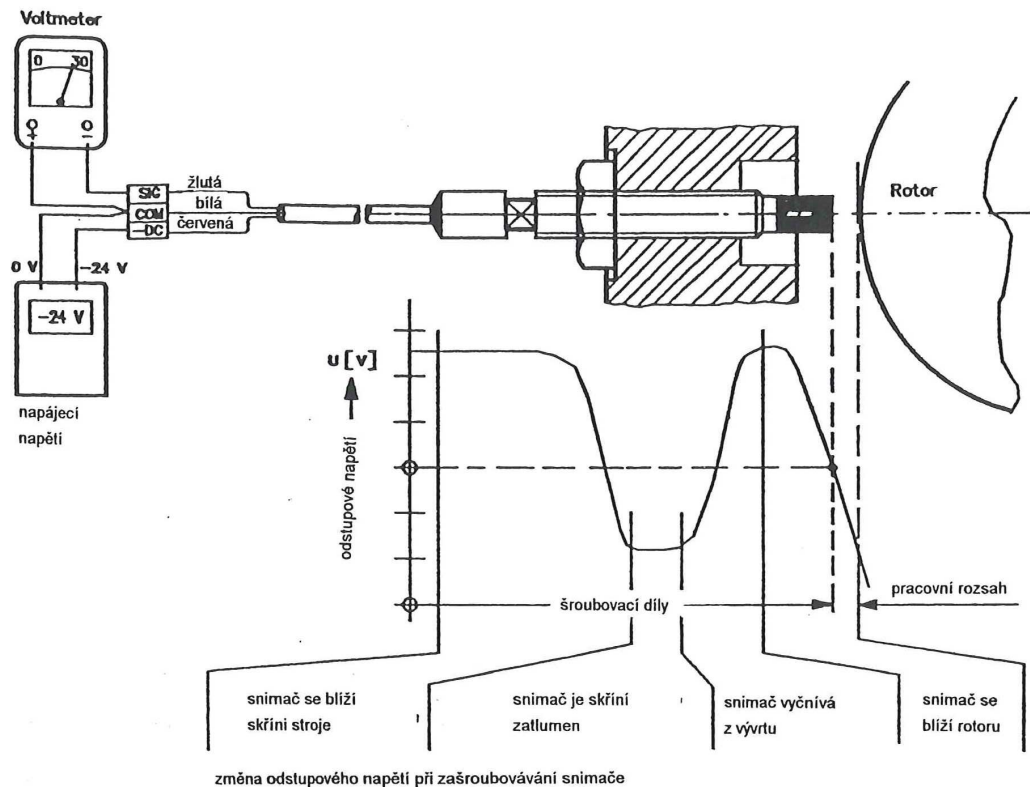
- snímače jsou připojeny přes oddělovací relé a rozděleny do dvou samostatně ovládaných skupin (pro první a druhé soustrojí daného dvojbloku),
- samostatnými výstupními relé, která odlišují sumární binární výstupy příslušné prvnímu a druhému soustrojí daného dvojbloku,
- každému soustrojí je v rozvaděči přiřazen centrální vypínač (jistič), kterým lze v případě potřeby odstavit příslušné snímače a zablokovat příslušné výstupy

zabezpečovacího zařízení; to umožňuje při odstávce jednoho soustrojí práci na snímačích a měřicích modulech bez ovlivnění funkce systému na druhém soustrojí dvojbloku.

Ve skříni jsou signály zavedeny do monitoru chvění tvořeného zásuvnými měřicími moduly ve společném výklopném rámu. Zde jsou:

- společný napájecí zdroj a ovládací panel,
- modul komunikace pro obě soustrojí, ke kterému se připojuje přenosný počítač,
- čtyři měřicí moduly pro dynamické signály z prvního soustrojí,
- zaslepovací panel a vedle něho měřicí modul pro diagnostické účely pro dvě soustrojí,
- za dalším zaslepovacím panelem jsou čtyři měřicí moduly pro dynamické signály z druhého soustrojí.

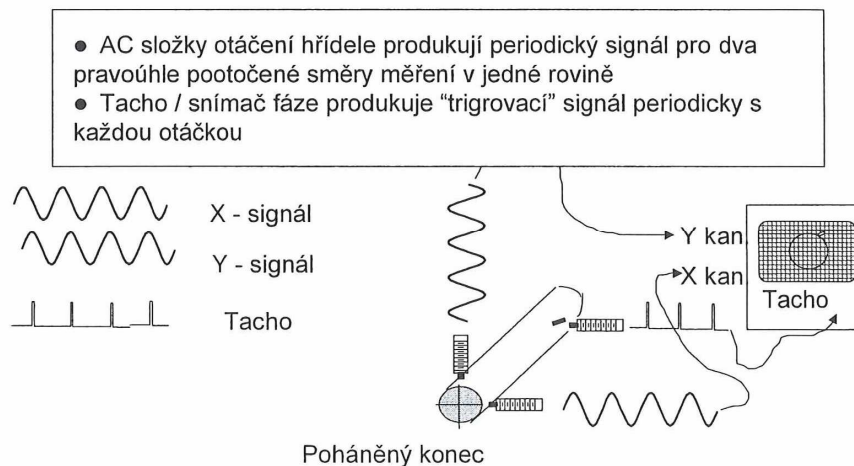
Vibrodiagnostické měření se provádí ve všech ložiskách radiálně a nad jedním ložiskem axiálně. Snímače pro měření relativního chvění hřídele jsou vždy umístěny v části ložiska, kde je vlastní měřicí dráha na běhounu (broušena část aktivní části ložiska) tak, aby byla zaručena co nejlepší kruhovitost a drsnost v měřicí části. Měří se mezi konstrukcí ložiska a hřídelí, kde je nejdůležitější vybrat místo na konstrukci. Místo by mělo být dostatečně tuhé z důvodu přenášení chvění konstrukce na snímače. Radiální měření chvění se provádí v každém ložisku pomocí dvou snímačů dráhy, kde jeden snímač je v ose proudění vody a druhý snímač je o 90° pootočen proti směru otáčení hřídele a tím je zaručeno měření ve dvou osách (X, Y). Samotné nastavení snímačů relativního chvění hřídele probíhá až po připojení sondy. Měří se napětí na svorkách obou čidel (obr. 12 Nastavení snímače dráhy) a nastavením vzdálenosti mezi hrotem snímače a běhounem ložiska se upraví výchozí svorkové napětí na obou snímačích. Toto je výchozí nastavení před prvním roztočením stroje. Vibrace každého soustrojí jsme schopni měřit v rozsahu 1,5 mm.



Obr. 12 Nastavení snímače dráhy, převzato z přílohy č. 3

Takto se nastaví a seřídí všechny snímače, které jsou v horním vodícím ložisku generátoru, v dolním vodícím ložisku generátoru a ve vodícím ložisku turbíny. Další snímač zrychlení je umístěn na každé nádobě ložiska za účelem měření absolutního chvění ložiska. Nad horním vodícím ložiskem generátoru je umístěn ještě jeden snímač dráhy, který měří axiální polohu hřídele a má za úkol měření chvění hřídele ve vertikální poloze. Nastavení snímače je stejné jako u radiálních snímačů. Po nastavení snímače se ve Vibrocontrol 4000[®] nastaví výchozí hodnota 0 μm . Axiální chvění se hlavně využívá pro účely snímání opotřebení závěsného (nosného) ložiska, přestože normou není požadováno.

Tacho neboli snímač fáze (snímač dráhy) má na dráze magnet nebo jiný prvek, který při průchodu pod snímačem vytváří jeden impuls za otáčku. Jednoduše řešeno tacho (snímač fáze) je snímač otáček. Princip a zobrazení viz obr. 13, Nastavení snímače fáze.



Obr. 13 Nastavení snímače fáze (tacho)

3.2.1 Fyzikální vlivy snímačů dráhy

Snímače dráhy jsou ověřeny na materiálu 1.7225 (42 CrMo 4) podle DIN 17200 odpovídající AISI/SAE 4140.

Při měření v měřící stopě, u bezkontaktních snímačů na principu vířivých proudů, může dojít ke zkreslení měřených hodnot. Toto zkreslení se váže k vlastnostem měřeného objektu. Označuje se jako **RUNOUT** a rozděluje se na **MECHANICKÝ RUNOUT A ELEKTRICKÝ RUNOUT**.

MECHANICKÝ RUNOUT

hlavní příčiny

- povrchové nerovnosti měřeného povrchu (měřící stopa)
- neokrouhlost měřící stopy (ovalita)

ELEKTRICKÝ RUNOUT

hlavní příčiny

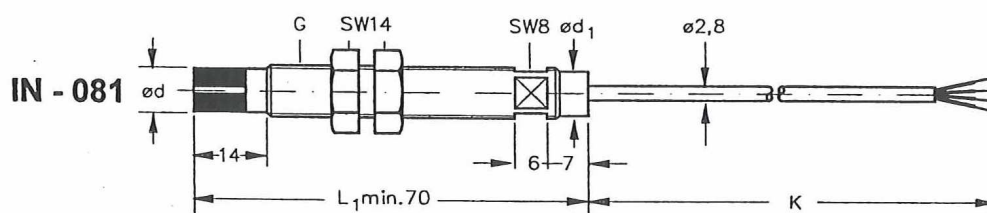
- kolísání elektrické vodivosti
- kolísání permeability v důsledku nehomogenity
- parciální zbytkový magnetismus

Požadavky na měřící stopu:

- Měřící stopa má být soustředná s obvodem ložiskového čepu
- Drsnost povrchu nemá přesáhnout 0,4-0,8 μm
- Materiál stopy má být homogenní (stejnorodá struktura)

3.2.2 Bezdotykový snímač dráhy

Bezdotykovými snímači dráhy (obr. 14, Rozměrový nákres snímače IN 081) lze měřit relativní vibrace hřídelů, relativní posuvy hřídelů, otáčky rotoru atd. Předpokladem pro měření je kovová měřící stopa, přednostně z materiálu 42Cr Mo4. Výstupní napětí snímače je v oblasti jeho měřícího rozsahu úměrné vzdálenosti mezi špičkou snímače a měřenou plochou. Vnější rušivé vlivy, elektromagnetické rušení, zemní smyčky, teplotní vlivy a dielektrické vlivy (olej, plyn) jsou zanedbatelné. Je možné přímé připojení na signální kabel délky až 1000 m. Kromě toho je možná výměna snímače bez dodatečné kalibrace. Snímač splňuje podstatné body požadavků na přesnost, stanovených standartem API 670 a normou DIN 45670670. Charakteristika měření, rozsah jednotlivých snímačů a schéma měřícího řetězce jsou zobrazeny v obr. 15 Charakteristika měření, obr. 16 Pracovní rozsahy snímačů vibrací, obr. 17 Měřící řetězec.



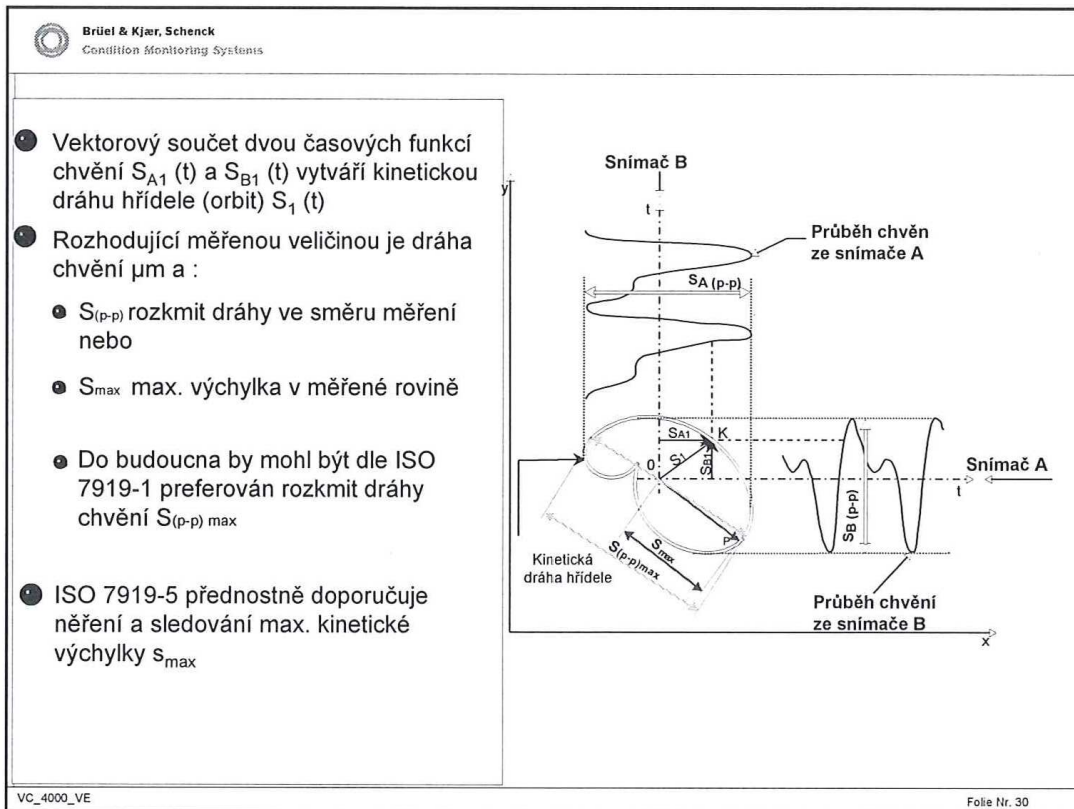
Obr. 14 Rozměrový nákres snímače IN 081

Závit G, průměr d_1 M10x1-6g, $\varnothing 8,5$ mm

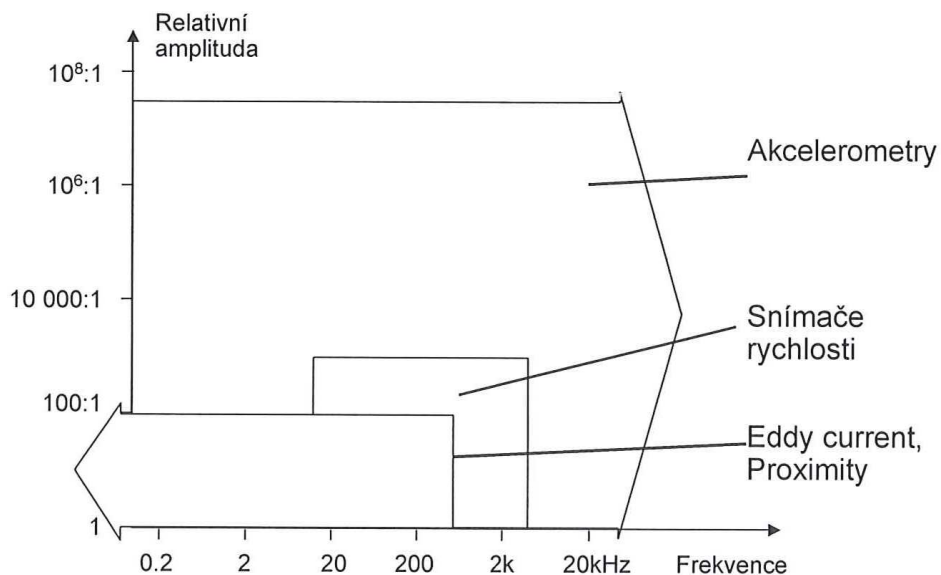
Délka snímače L_1 70-250 mm

Délka kabelu K 2,3 m, otevřený konec

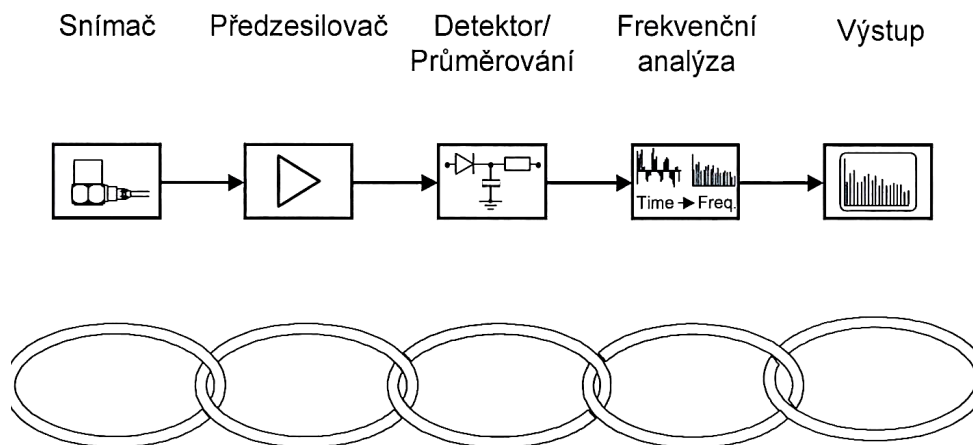
Technická data a charakteristika snímače viz příloha č.3



Obr. 15 Charakteristika měření



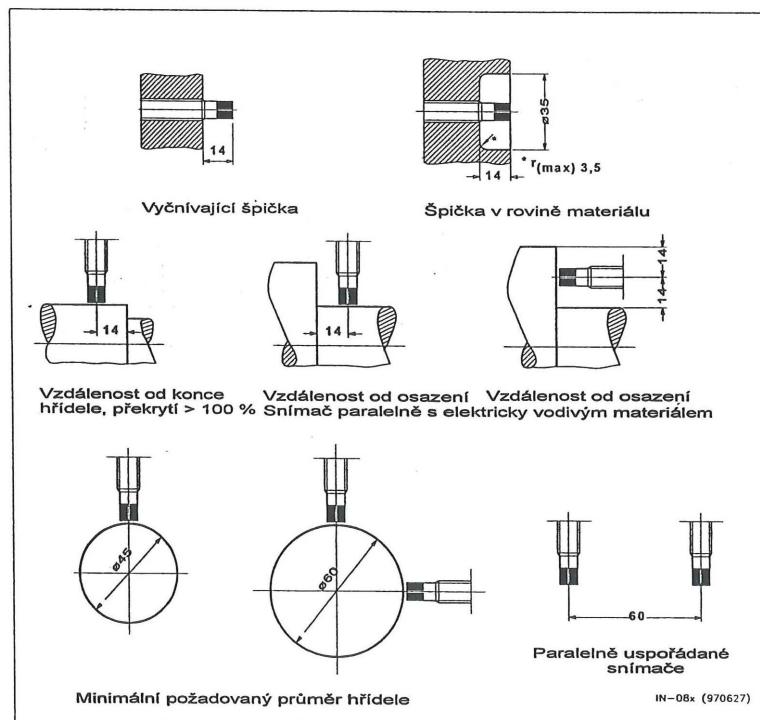
Obr. 16 Pracovní rozsahy snímačů vibrací



Obr. 17 Měřicí řetězec

Volné prostory a minimální odstupy snímačů

Bezdotykové snímače dráhy pracují na principu vířivých proudů, vytváří vysokofrekvenční magnetické pole. Pokud se v tom poli kromě měřeného objektu vyskytuje elektricky vodivý materiál, je výsledek měření zkreslen. Proto musí být při vestavbě snímačů dráhy zachovány následující volné prostory a dodrženy minimální odstupy; viz obr. 18.



Obr. 18 Minimální odstupy

3.2.3 Funkce systému a jeho vazba na ŘS

Zabezpečovací systém monitorování vibrací má tyto základní funkce:

- brání provozu soustrojí s nebezpečnou úrovní vibrací (překročení nastavených mezí vede k poruchovému hlášení či odstavení soustrojí poruchou),
- na sledovacích výstupech dává k dispozici impedančně oddělené signály vibrací a posuvů pro připojení přenosného analyzátoru.

Každý měřicí modul je vybaven:

- dvěma nezávislými měřicími kanály,
- samostatným displejem pro každý měřicí kanál,
- indikačními LED diodami příslušnými každé ze čtyř limit, samostatně pro každý kanál,
- indikací správné funkce jednotky, snímače a kabelové trasy (OK signál),
- čtyřmi výstupními relé volně programově přiřaditelnými sledovaným limitám s nastavitelným zpožděním reakce,
- unifikovanými výstupy (proudovými či napět'ovými) signálu úměrného měřené hodnotě,
- sledovacími výstupy s BNC konektory signálů z čidel pro připojení dalších systémů (např. speciálních analyzátorů),
- řídicím vstupem, kterým lze např. aktivovat násobení nastavených hodnot limit zvolenými koeficienty při rozběhu či doběhu soustrojí.

Veškerá nastavení konfiguračních parametrů jednotek (typ čidla, měřicí rozsahy, mezní hodnoty atp.) se dějí prostřednictvím konfiguračního programu v přenosném počítači dočasně připojeném na servisní vstup komunikační jednotky. Umístění základního měření viz obr. 19 Jednoduché schéma.

3.2.3.1 Vstupy zabezpečovacího systému:

- signály ze snímačů chvění,
- binární signály z řídicího systému soustrojí (spínací kontakt na straně ŘS - probíhá najíždění nebo odstavování soustrojí); tyto signály zajišťují automatickou změnu mezí podle provozního režimu soustrojí.

3.2.3.2 Výstupy zabezpečovacího systému:

- binární poruchová hlášení,
- DC signály úměrné sledovaným hodnotám (např. maximální kinetická výchylka hřídele s_{\max} , rozkmit dráhy s_{pp}), které jsou k dispozici pro připojení k ŘS,
- sledovací výstupy časových signálů ze snímačů chvění a otáček na BNC konektorech pro připojení analyzátoru vibrací.

3.2.3.3 Význam poruchových hlášení předávaných do ŘS

Všechny reléové výstupy jednotlivých měřicích modulů jsou naprogramovány a zapojeny tak, že systém má navenek pro každé soustrojí jen pět souhrnných poruchových hlášení:

- Výstraha „VIBROCONTROL-porucha“ - závada na vlastní měřicí aparatuře (snímači či modulu), doprovázena je pohaslou zelenou LED diodou na centrální jednotce. Signalizace znamená:
 - napájení monitoru chvění bylo minimálně 20 ms přerušeno,
 - došlo k závadě na některém měřicím kanálu prvního či druhého soustrojí, vadný kanál je odlišen blikající zelenou LED „OK“. Nejčastějšími závadami jsou poškozený snímač, přerušovaný či odpojený kabel snímače, nesprávný odstup bezdotykového čidla od měřicí stopy. Porucha vlastní měřicí karty se projeví pohaslou LED „OK“ příslušného kanálu.
- Výstraha „VIBRO-LIM 1“ - jedná se o logický součet dílčích hlášení o překročení (dosažení max. úrovně signálu) některé z limit LIM 1 měření hřídelových vibrací.
- Výstraha „VIBRO-TREND“ - jedná se o logický součet dílčích hlášení o překročení některé z limit TREND na kanálech měření hřídelových a ložiskových vibrací. Indikuje, že rychlost nárůstu chvění (rozdíl mezi aktuální a v čase proměnné referenční hodnoty v procentech měřicího rozsahu) je větší než zadaná hodnota.
- Výstraha „VIBRO-LIM x“ - jedná se o logický součet dílčích hlášení o překročení některé z limit LIM x na kanálech měření hřídelových vibrací. Aktivace tohoto hlášení znamená, že statická poloha hřídele v ložisku je mimo povolené pásmo (změna ložiskové vůle).
- Výstraha „VIBRO-LIM 2“ - jedná se o logický součet dílčích hlášení o překročení některé z limit LIM 2. Signál vyvolá odstavení soustrojí poruchou.

Signály poruchových hlášení jsou kromě zápisu zobrazovány na obrazovce ŘS „PORUCHY 2“.

3.2.4 Rozlišení chvění

Chvění v jednotlivých fázích (dle opotřebení) se od sebe liší.

Proto jsou pro jednotlivá soustrojí nastaveny hranice, které se od sebe liší velikostí limitů podle konstrukce a způsobu uložení soustrojí.

Chvění je rozděleno na čtyři skupiny:

- „A“ V tomto pásmu mají být za normálních podmínek vibrace nově přejímaných strojů.
- „B“ Stroje, jejichž vibrace jsou v tomto pásmu, mohou být zpravidla provozovány po neomezeně dlouhou dobu.
- „C“ Stroje, jejichž vibrace jsou v tomto pásmu, jsou za normálních podmínek považovány za neuspokojivé pro dlouhodobý trvalý provoz. Obecně mohou být stroje za takovýchto podmínek provozovány do té doby, než se najde možnost nápravy.
- „D“ Hodnoty vibrací v tomto pásmu jsou za normálních okolností považovány za natolik nebezpečné, že mohou způsobit poškození stroje.

Základní nastavení

Nastavení skupin podle zařízení, jak již bylo uvedeno výše a v předchozí kapitole 2.1.1, je závislé na poloze zařízení (horizontálně, vertikálně) a na konstrukci umístění ložisek.

Pro soustrojí na elektrárně Kamýk byly nastaveny maximální limity pro skupiny takto:

Absolutní vibrace na konstrukci		Relativní vibrace hřídele
A - 1,6 mms	30 μm	165 μm
B – 2,5 mms	50 μm	265 μm
C – 4,0 mms	80 μm	520 μm
D – nad 4,0 mms	nad 80 μm	nad 520 μm

Měření vibrací není jednoduchá záležitost, protože se vyskytují na různých strojích různé typy a je na diagnostikovi, jak dokáže hodnoty vyhodnotit, jakým způsobem rozpozná, o jakou chybu se jedná, a jak dokáže stanovit příčinu. Nejdůležitější vibrace se vyskytují v první harmonické, v druhé harmonické popř. v třetí harmonické frekvenci. Toto je dáno vysokou hmotností a malými otáčkami stroje, proto se vyšší harmonické frekvence neuplatňují a téměř na těchto zařízení nic nevypovídají. Proto je důležitá historie vibrací, z které se dá usoudit, jaké vibrace se na stroji vyskytovaly při

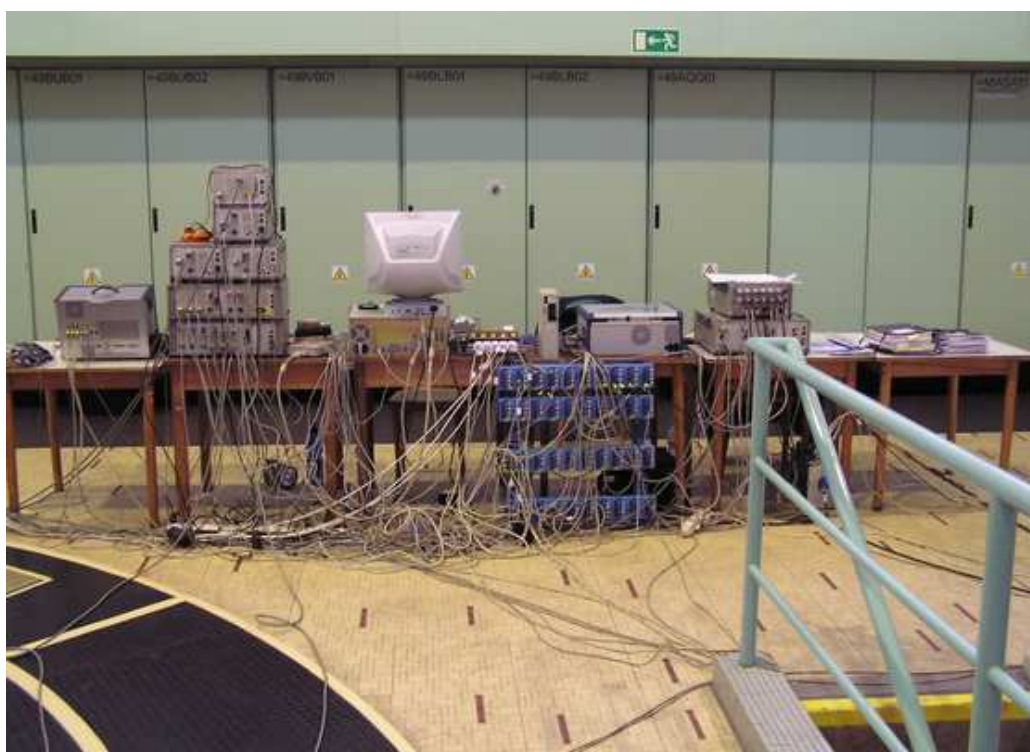
uvedení do provozu a jak se dále vyskytovaly nebo zvyšovaly. Většinou na tyto neshody nestačí základní měření a použije se ještě doplňkové měření vibrací pomocí dalších snímačů a jiných metod vyhodnocení nebo se volí úplně jiná metoda, např. měření hluku nebo tenzometrie (obr. 20 Pohled na strojovnu, obr. 21 Umístění měřící techniky ve strojovně, obr. 22 Propojení měřící techniky kabeláží ve strojovně při vlastním měření vibrací).



Obr. 20 Pohled na strojovnu, foto autor



Obr. 21 Umístění měřící techniky ve strojovně, foto autor



Obr. 22 Propojení měřící techniky kabeláží ve strojovně při vlastním měření vibrací, foto autor

3.2.5 Druhy vibrací vyskytujících se u vodních turbín

U hydraulických strojů se mohou hřídelové vibrace vyskytovat v širokém pásmu frekvencí.

Podle příčiny vzniku se rozdělují vibrace na:

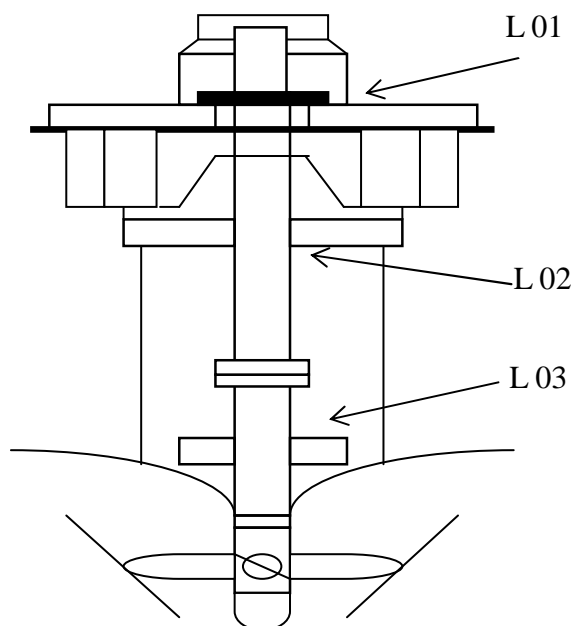
- Mechanické – nesprávné ustavení hřídele, anizotropie ložisek, nestabilita olejového filmu, třecí síly a zbytková nevyváženost rotoru nebo oběžného kola, rotoru generátoru nebo rotoru budiče.
- Elektrické - nesprávně vyrovnaný magnetický tah v rotoru nebo nerovnoměrná vzduchová mezera u připojených elektrických strojů.
- Hydraulické
 - hydraulická nevyváženost (proudění vody vodními cestami)
 - nestabilita proudění v savce
 - kavitace (nesprávné proudění vody kolem oběžného kola)
 - hydroelastické vibrace (špatný tvar odtokových hran)
 - samobuzené (pohyb mechanických částí ovlivňuje proudění kolem nich)
- Další buzení – v normálních přechodových podmínkách, najíždění, odstavování

3.2.5.1 Nejvýznamnější montážní chyby, které ovlivňují vibrace:

- tzv. klika – osové vychýlení ve spojce mezi generátorem a turbínou
- nestejná vzduchová mezera mezi póly rotoru a statorovým vinutím má za následek nehomogenní magnetický tah generátoru
- velká vůle v ložiskách
- celkové vertikální vyvážení soustrojí a nedovažky
- kavitace oběžného kola

3.2.6 Vlastní měření vibrací, výsledky

Popis a parametry vlastního měření včetně konečných výsledků uvedených na obr. 19
Jednoduché schéma viz tab. 7 Měřené veličiny, tab. 8 Naměřené hodnoty.



<p>Název bodů: <u>Absolutní vibrace</u> Horní vodící ložisko generátoru L 01X (HVLG-RX) Horní vodící ložisko generátoru L 01Y (HVLG-RX) Hlava -HLAVA-RX Hlava - HLAVA-RY Vodící lož. turbíny L 03X(Abs.VLT-RX) Dolní vodící ložisko generátoru L 02X (Abs.DVLG-RX) Horní vodící ložisko generátoru L 01X (Abs.HVLG-RX)</p>	<p>Umístění: Ve směru proti proudu řeky, v ose ve směru kolmém na proud řeky ve směru proti proudu toku řeky, v ose stroje ve směru kolmém na proud vody součást zabezpeč. zařízení SCHENCK® součást zabezpeč. zařízení SCHENCK® součást zabezpeč. zařízení SCHENCK®</p>	<p>Měření je značeno: Absolutní vibrace X - ve směru toku řeky Y - kolmo na tok řeky Relativní vibrace: X - ve směru toku řeky Y - kolmo na tok řeky</p>
<p><u>Relativní hřídelové vibrace</u> Hřídel u turbínového ložiska L 03X (TXD-RX) Hřídel u turbínového ložiska L 03Y(TYD-RY) Hřídel u dolního ložiska generátoru L 02X (DGXD-RX) Hřídel u dolního ložiska generátoru L 02Y (DGYD-RY) Hřídel u horního ložiska generátoru L 01X (HGXD-RX) Hřídel u horního ložiska generátoru L 01Y (HGYD-RY)</p>	<p>součást zabezpeč. zařízení SCHENCK® součást zabezpeč. zařízení SCHENCK® součást zabezpeč. zařízení SCHENCK® součást zabezpeč. zařízení SCHENCK® součást zabezpeč. zařízení SCHENCK® součást zabezpeč. zařízení SCHENCK®</p>	

Obr. 19 Jednoduché schéma

Tab. 7 Měřené veličiny- protokol měření

Značka	Název	V rozsahu	Jednotky
Absolutní vibrace:			
DIS 1	Rozkmit S_{p-p}	2 - 500 Hz	μm
VEL 1	Ef. hodnota v_{ef}	2 - 1000 Hz	mm/s
DIS OCT6	Rozkmit S_{p-p}	1,5 - 500 Hz	μm
VEL 0-5	Ef. hodnota v_{ef}	1 - 1350 Hz	mm/s
Phase 1 XF			úhlový stupeň
Relativní vibrace:			
DIS 1	Rozkmit S_{p-p}	1,5 - 500 Hz	μm
Orbita XY	Rozkmit		μm
DIS OCT6	Rozkmit S_{p-p}	1,5 - 500 Hz	μm
VEL 0 - 3	Rozkmit S_{p-p}	1 - 350 Hz	μm
Phase 1 XF			úhlový stupeň
S_{max}	Max. relativní výchylka vibrací hřídele		μm

Kritéria pro hodnocení vibrací dle normy ČSN ISO 10816-5, 7919-5 [5, 6]

Absolutní vibrace dle ČSN ISO 10816-5:				
Ložisko L 01		S_{p-p} [μm] / v_{ef} [mm/s]		
Pásmo A	výborný chod	do 65 / 2,5		
Pásmo B	dobry chod	do 100 / 4,0		
Pásmo C	neuspokojivý chod	do 160 / 6,4		
Pásmo D	nepřípustný chod	nad 160 / 6,4		
Ložisko L 02, 03				
Pásmo A	výborný chod	do 30 / 0,6		
Pásmo B	dobry chod	do 50 / 2,5		
Pásmo C	neuspokojivý chod	do 80 / 4,0		
Pásmo D	nepřípustný chod	nad 80 / 4,0		
Relativní vibrace dle ČSN ISO 7919-5:				
		S_{p-p} [μm]		
Pásmo A	výborný chod	do 155		
Pásmo B	dobry chod	do 260		
Pásmo C	neuspokojivý chod	do 520		
Pásmo D	nepřípustný chod	nad 520		
Stanovené limitní hodnoty:				
Abs. vibrace	Generátor	L 01, L 02	A1 1,6 mm/s	A2 2,5 mm/s
	Turbína	L 03	A1 1,6 mm/s	A2 2,5mm/s
Rel. vibrace (S_{max})	Generátor	L 01, L 02	A1 250 μm	A2 350 μm
	Turbína	L 03	A1 270 μm	A2 300 μm

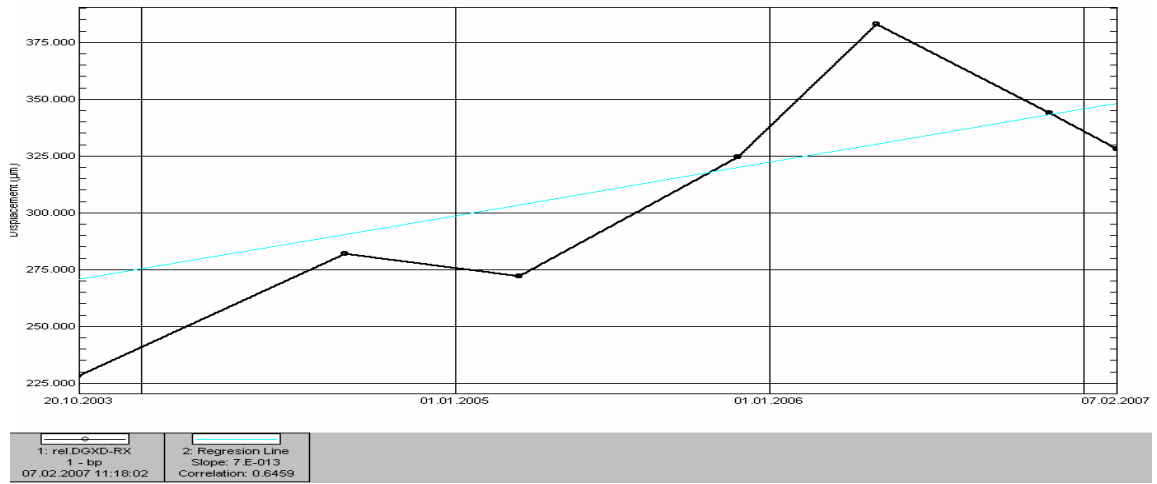
Tab. 8 Naměřené hodnoty

Absolutní vibrace ložisek – TG1.		
Parametry při měření:		
Výkon (P): [MW]	Výkon (Q jal):[MVAr]	Spád: [m]
8,5	0,0	12,84

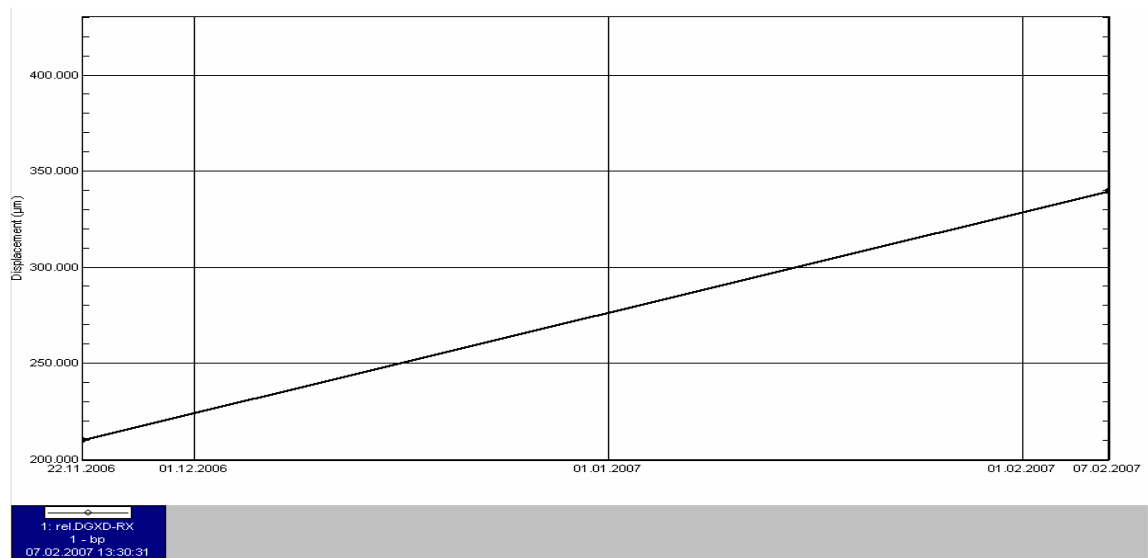
Místo	Směr Osa	Sp-p [μm]	RMS [mm/s]	Stav stroje	Poznámka:
L 01(HVLG)	X	61	0,4	A -B	
	Y	70	0,4		
L 02(Abs.DVLG)	X	43	0,3	A	
	Y	***	***		
L 03(Abs.VLT)	X	31	0,4	A	
	Y	***	***		
HLAVA	X	***	***		
	Y	***	***		

Relativní vibrace hřídele – TG1.			
Parametry při měření:			
Výkon (P): [MW]	Výkon (Q jal):[MVAr]	Spád: [m]	Průtok: [m3/s]
8,5	0,0	12,84	

Ložisko	Osa	Sp-p [μm]	Smax [μm]	1x [μm]	fáze 1x [°]	Stav stroje	Poznámka:
L01(HGXD)	X	308	180	250	185	C	
	Y	276		242	103		
L02(DGXD)	X	328	197	301	-126	C	
	Y	347		319	146		
L03(TXD)	X	184	61	126	64	B	
	Y	189		95	-37		



Obr. 23 Trend relativních vibrací hřídele v místě dolního vodícího ložiska generátoru



Obr. 24 Velikost relativních vibrací hřídele v místě dolního vodícího ložiska nepřifázovaného soustrojí po dvou hodinách chodu

Závěr z provedeného měření vibrací:

Dle výše uvedených výsledků z měření vyplývá, že na soustrojí se zvyšují relativní vibrace hřídele, nejmarkantněji v místech horního a dolního ložiska generátoru v celém rozsahu výkonu včetně strojního chodu (u nepřifázovaného stroje bez nabuzení). V průběhu předešlých měření se za určitých provozních podmínek hodnoty rozkmitu přibližují nebo odpovídají vřím v ložiscích, což má za následek značné jejich zatížení,

silné dynamické namáhání celé konstrukce a vyšší opotřebením inkriminovaných částí. Zařízení dle naměřených hodnot odpovídá pásmu „C“, kdy pravidelné provozování soustrojí není dovoleno, protože dochází již v tomto pásmu k nevratnému poškození zařízení. Periodickou kontrolou byl potvrzen fakt neustále se zvyšujících hodnot a to zejména relativních vibrací obr. 23, obr. 24. U soustrojí je zapotřebí odstranit celkovou nesouosost.

Výsledky měření na hydrogenerátoru

Max. naměřená hodnota absolut.vibrací na stroji ve [mm/s] na pozici:

generátor	0,4 ±0,1 na L 01X.Y
turbína	0,4 ±0,1 na L 03X

Max. naměřená hodnota absolut.vibrací na stroji Sp-p [μm] na pozici:

generátor	70 ± 3 na L 01Y
turbína	31 ± 1 na L 01X

Max. naměřená hodnota rel.vibrací na stroji Sp-p [μm] na pozici:

generátor	347 ±10 na L 02Y
turbína	189 ± 6 na L 03Y

Celkový stav zařízení se pohybuje v pásmu „C“

Diagnóza - nesouosost soustrojí

3.3 Další měření prováděné na systému

3.3.1 Proudění vody

Aby se mohla určit účinnost turbíny je velmi důležitým faktorem průtok vody přes turbínu a proudění vody celým prostorem nad oběžnými lopatami a prostorem savky. Při porušení optimálního proudění dochází ke zvýšeným vibracím ve vodícím ložisku turbíny a tím vzniká vyšší namáhání ložiska a ostatních částí. Voda, která má být odsávána savkou, dostává jiný smysl proudění, snižuje se účinnost a dochází ke kavitaci oběžných lopat a komory oběžného kola. Kavitace je vznik dutin v kapalině, obvykle na spodní vnější hraně oběžné lopaty při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí. Pokles tlaku může být důsledkem lokálního zvýšení rychlosti (tzv. hydrodynamická kavitace). Při vymizení podtlaku, který kavitaci vytvořil, bublina kolabuje za vzniku rázové vlny s destruktivním účinkem na okolní materiál a dochází k

pomalému úbytku materiálu. Drsnější povrch má za následek snadnější vytvoření vakuových bublin a tím usnadňuje podmínky pro kavitaci. Proto jsou oběžné lopaty a komora oběžného kola vyrobeny z nerezové ušlechtilé oceli a jejich povrch je leštěn. Kavítace kromě snížení účinnosti způsobuje hluk a může způsobit i mechanické poškození oběžných lopat (obr. 25 Poškozená oběžná lopata kavitací). Na vznik kavítace má vliv především velikost podtlaku, soudržnost (povrchové napětí).



Obr. 25 Poškozená oběžná lopata kavitací, foto autor

3.3.2 Měření průtoku

Měření průtoku se za normálního provozu neprovádí a je odvozeno z předešlých měření v závislosti na spádu, otevření RK a OK tzv. nastavení vazby (závislost nastavení RK, OK pro různé spády s ohledem na účinnost stroje a proudění vody).

3.3.2.1 Původní záměr měření průtoku

Primární metodou pro výpočet průtoku turbínou se původně zamýšlela integrační metoda pomocí vodoměrných vrtulí, sekundární indexová metoda. Kalibrace indexové metody se provádí absolutní integrační metodou.

- Indexová metoda:

Stávající tlakové odběry jsou vyvedeny ze spirály do prostoru víka turbíny. Základní obecná rovnice pro výpočet průtoku

$$Q_i = k_i \times \Delta p_i^{m_i} \quad (1)$$

Kde: Q_i = průtok indexové metody

k_i = koeficient indexové metody

m_i = exponent indexové metody, který může být v rozsahu 0.48 až 0.52

Kalibrace indexové metody se provádí absolutní integrační metodou.

- **Integrační metoda**

Pro měření průtoku se využil profil v drážce tabulových uzávěrů před rychlozávěrem.

K měření rychlosti vody se použil měrný vozík vlastní konstrukce nesoucí 12 hydrometrických vrtulí, který se pohybuje v drážkách provizorního hrazení vtoku. Měrný vozík se uvádí do pohybu elektrickým kladkostrojem zavěšeným na háku portálového jeřábu. Rychlost spouštění a zvedání měrného vozíku je v obou směrech konstantní a činí na základě technické dokumentace 1.4 m.s-1. Současně s měřením průtoku bude měřena volná hladina ve vtoku v místě drážek hrazení pro stanovení měrného průřezu pomocí měrného talíře a pásma. Jedná se o úlohu výpočtu průtoku integrační metodou v kanále s volnou hladinou. Nátok na elektrárně je rozdělen do dvou identických vtoků, levý vtok (index L) a pravý vtok (index P).

$$Q_L = (Q_{LD} + Q_{LN})/2 \quad (2)$$

Kde: Q_L = aritmetický průměr průtoku levým vtokem

Q_{LD} = aritmetický průměr průtoku při pojezdu vozíku dolů levým vtokem

Q_{LN} = aritmetický průměr průtoku při pojezdu vozíku nahoru levým vtokem

$$Q_P = (Q_{PD} + Q_{PN})/2 \quad (3)$$

Kde: Q_P = aritmetický průměr průtoku pravým vtokem

Q_{PD} = aritmetický průměr průtoku při pojezdu vozíku dolů pravým vtokem

Q_{PN} = aritmetický průměr průtoku při pojezdu vozíku nahoru pravým vtokem

Výsledný průtok Q je dán součtem

$$Q = Q_L + Q_P \quad (4)$$

Kde průtoky Q_L a Q_P jsou stanoveny jako aritmetický průměr z hodnoty průtoku změřeného při

pojezdu vozíku směrem dolů (index D) a směrem nahoru (index N).

3.3.2.2 *Měření průtoku pro speciální účely při uvádění do provozu*

Při použití výše uvedené metody předběžné vyhodnocení ukázalo, že integrační metodou aplikovanou v měřeném místě vtokového objektu nelze získat reálné hodnoty. Proto bylo rozhodnuto, že hydrometrování bude provedeno bodovou metodou, při které se vozík zastavuje v jednotlivých vrstvách měrného profilu. Touto metodou bylo zahájeno měření pro jednotlivé body nastavení RK, OK. Toto měření se osvědčilo jako nejlepší volba měření průtoku přiváděcím profilem.

- **Měření účinnosti**

Měření účinnosti se provádí za účelem stanovení vazby mezi otevřením oběžného kola a rozváděcích lopat a má za úkol ověřit garantované hodnoty nového oběžného kola. Vazba je určena rovnicí třetího polynomu a má nejvýznamnější vliv na chování soustrojí a proudění vody kavitace. Toto měření se provádí pouze před a po GO soustrojí, aby se mohly porovnat výchozí a stanovené parametry.

4 Závěr

V práci bylo provedeno poměrně detailní seznámení se soustrojím vodní elektrárny jednak popisem, uvedením technických parametrů a též formou foto dokumentace. Dále je uveden popis a detailní vysvětlení principů a účelu revizních periodických měření. Autor je orientován na měření vibrací, které bylo též vysvětleno a popsáno. Vlastním výstupem práce bylo provedení vibračních měření včetně jejich vyhodnocení a prezentace, na kterých se autor osobně podílel.

Závěrem lze říci, že naměřené hodnoty vykazují odchylky od požadovaných hodnot a soustrojí je nutno podrobit další diagnostice.

Seznam literatury

- [1] Místní provozní předpisy pro vodní elektrárnu Kamýk

- [2] Bašta, J., Chládek, J., Mayer, I. Teorie elektrických strojů. 1.vyd. Praha: SNTL, 1968. počet stran. ISBN

- [3] Bašta, J., Kulda, V., Měřička, J. a kol. Měření na elektrických strojích (1. Všeobecná část). 2.vyd. Praha: SNTL, 1959. 139 s.

- [4] Bašta, J., Kulda, Zoubek, Z. Měření na elektrických strojích (5. Měření na synchronních strojích).1.vyd. Praha: SNTL, 1964

- [5] ČSN ISO 10816-5

- [6] ČSN ISO 7919-5