

VIZUÁLNÍ KONTROLY VN TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ

VISUAL INSPECTIONS OF HV ROTATING ELECTRICAL MACHINES

Petr Živný

Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Abstrakt

Vysokonapětové synchronní stroje jsou nejčastěji využívány jako generátory sloužící k výrobě elektrické energie nejen v jaderných elektrárnách, ale i klasických tepelných, větrných a vodních elektrárnách. Pro zajištění spolehlivé výroby a dodávky elektrické energie jsou součástí pravidelných diagnostických kontrol zařízení také vizuální inspekce. Diagnostické kontroly jsou podrobeny jednotlivé části stroje tak, aby byla odhalena případná závada včas a nebylo nutné generátor, potažmo celý blok elektrárny neplánovaně odstavit z důvodu poruchy.

Pro správné vyhodnocení stavu posuzovaných komponent je nezbytná celková znalost konstrukce stroje a technologie výroby společně se znalostí projevů rozvíjejících se vad, aby je bylo možné řádně lokalizovat. Na základě vyhodnocení zjištěného stavu jsou přijímána příslušná opatření přispívající ke zmírňování dopadů stárnutí sledovaných částí stroje. Monitorování a hodnocení celkového technického stavu generátoru probíhá prakticky po celou dobu jeho provozování s cílem průběžně hodnotit zbývající životnost zařízení.

Abstract

The high-voltage synchronous machines are very often used as generators for the production of electric power not only in nuclear power plants but also in conventional thermal, wind, and hydropower plants. Regular diagnostic equipment checks also include visual inspections to ensure reliable production and supply of the power. The individual parts of the machine are subjected to a diagnostic check so that a possible fault is detected in time, and it is not necessary to unplanned shutdown of the generator or complete unit of the power plant due to a fault.

For a correct evaluation of the condition assessed components, overall knowledge of the machine design and production technology, together with knowledge of the marks of developing defects, is necessary so that they can be detected in time. Based on the evaluation of the detected condition, appropriate measures are taken that contribute to reducing the effects of aging of the monitored machine parts. Monitoring and evaluation of the overall technical condition of the generator takes place practically throughout its operation with the aim of continuously evaluating the service life of the equipment.

Úvod

Hlavní pozornost v rámci tohoto článku je věnována vizuálním inspekcím vysokonapětových (VN) synchronních strojů, které jsou provozovány nejen jako generátory, ale v rámci přečerpávacích elektráren, také jako motor – generátory pohánějící reverzibilní turbíny. Na tyto stroje jsou v současné době kladeny obrovské nároky z pohledu jejich dostupnosti a spolehlivosti. Vlivem navyšování podílu výroby el. energie z fotovoltaických a větrných elektráren značně stoupla důležitost přečerpávacích elektráren z důvodu potřeby akumulace velkého množství přebytečné energie.

Obecně lze generátor popsat jako zařízení, které slouží k přeměně mechanické energie na elektrickou. Nejčastěji jsou využívány synchronní vysokonapětové točivé stroje poháněné turbínou. Turbína dodává generátoru potřebnou mechanickou energii, která je přenášena přes hřídel a spojku na rotor generátoru. Zde při průchodu stejnosměrného proudu rotorovým vinu-

tím a otáčením rotoru je vytvářeno točivé magnetické pole. To přechází přes vzduchovou mezeru do magnetického obvodu statoru, ve kterém se uzavírá magnetický tok. V magnetickém obvodu statoru je umístěno statorové vinutí, do kterého se indukují střídavé napětí. Vyrobená elektrická energie se následně z generátoru přenáší přes blokový transformátor do elektrické sítě. Konstrukční řešení generátoru, obdobně jako turbíny, vychází z konkrétních provozních parametrů a použití. Ve srovnání s turbínou je v generátoru použito mnohem více různorodých materiálů. Ve velké míře jsou zde zastoupeny i drahé kovy jako je například stříbro, různé druhy bronzů, měď a další.

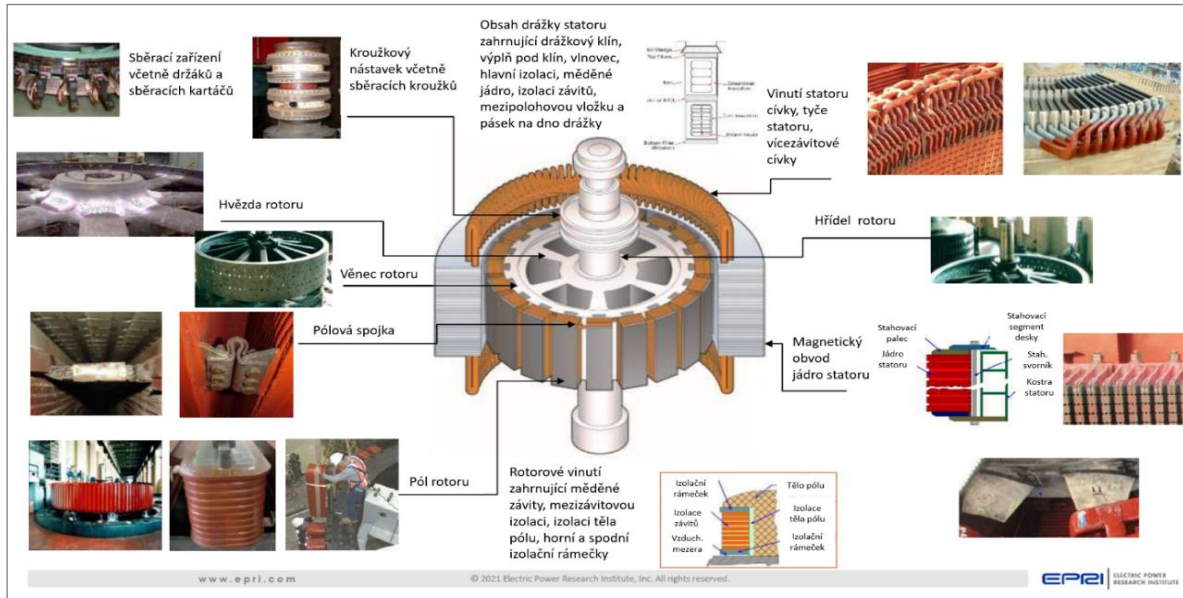
Z pohledu konstrukce je generátor poměrně složitý stroj, který musí být schopen dlouhodobě odolávat nejen mechanickému, ale i elektrickému a tepelnému namáhání. Jsou na něj kladeny vysoké nároky z pohledu spolehlivosti a bezpečnosti provozu, a proto musí být nejen bezpečně navrženy, ale i pravidelně zkoušeny a kontrolovány. Vizuální inspekce generátorů, je nedílnou součástí diagnostických kontrol, měření a zkoušek, které se provádí v pravidelných intervalech a rozsahu doporučených výrobcem. Jak stroj stárne, dochází k opotřebení a odčerpání životnosti některých částí. Proto je nezbytné věnovat zvýšenou pozornost stopám počáteční degradace nebo částečnému poškození, které se v rámci následného provozu může rozvinout a vést až k havárii stroje. Diagnostika a inspekce je zaměřena na rotační i statické části. Rotační části jsou namáhány zejména mechanicky, kdy na ně působí vlivem jejich velké hmotnosti a vysoké obvodové rychlosti značná odstředivá síla. Statické části jsou namáhány střídavým elektrickým napětím, zvýšenou teplotou, vibracemi, nečistotami v chladicím médiu a jsou vystaveny působení specifických chemických látek. Vizuální kontrola stroje patří k nejjednodušším, ale velmi důležitým metodám sledování celkového stavu stroje [1].

Základní rozdělení VN synchronních generátorů

Synchronní generátory lze dělit dle různých kritérií. Primární dělení je dle typu stroje na hydrogenerátory a turbogenerátory. Hydrogenerátory jsou nejčastěji s vertikální osou rotace rotoru, naopak u turbogenerátorů je osa rotace rotoru horizontální. Rozměry generátoru vychází nejen z výkonu stroje, ale také z otáček turbíny a způsobu chlazení. Protože vodní turbíny dosahují nižších otáček než parní, musí být rotory hydrogenerátorů vícepólové, a proto jsou větších průměrů ve srovnání s turbogenerátory (tzv. turboalternátory). Jedná se o rychloběžné stroje, nejčastěji dvou pólové (někdy i čtyřpólové), které jsou konstruovány s válcovým rotorem s osovou délkou přesahující i 7 m [2].

Je vhodné též zmínit způsoby chlazení generátoru. Zde rozlišujeme stroje s vnějším chlazením, které se používá pouze pro malé výkony (ztrátové teplo je vyzařováno z povrchu žebrovaného pláště stroje) a stroje s vnitřním uzavřeným chladicím okruhem (vzduch procházející strojem odebírá ztrátové teplo z aktivních částí a následně ho předává chladicí vodě cirkulující v chladicích stroje). U těchto strojů je však převážně statorové vinutí chlazeno nepřímou (ztrátové teplo je odebíráno z povrchu izolace). Jedná se o nejrozšířenější způsob chlazení strojů menších výkonů. Pro zvýšení účinnosti chlazení a zvýšení elektroizolační pevnosti je u strojů středního výkonu používán jako chladicí médium vodík. Statorové vinutí může být obdobně jakou u vzduchových strojů chlazeno nepřímou i přímo. V takovém případě prochází chladicí médium (vodík) statorovým vinutím speciálními chladicími kanály umístěnými v těsné blízkosti měděného jádra jednotlivých pólů. S přímým chlazením mohou být konstruovány i vývodní pasy a vývody generátoru. U strojů chlazených vodíkem je nezbytné zajistit celkovou těsnost všech jeho částí. Vodíková náplň stroje musí být v průběhu provozu stroje vysoušena, musí být regulován její tlak a teplota. Vodík jako chladicí médium však přináší určité komplikace, při koncentraci ve vzduchu 4 až 75 % vzniká výbušná směs. Proto je v rámci plynového hospodářství nezbytné řešit změnu náplně vnitřního prostoru generátoru ze vzduchu na oxid uhličitý a následně na vodík (při odstavení stroje se používá obrácený postup). Pro generátory největších výkonů je aplikováno chlazení kombinované, u většiny strojů se jedná převážně o

přímé chlazení satorového vinutí demineralizovanou vodou a chlazení všech ostatních částí je realizováno vodíkem, nebo ve výjimečných případech i vzduchem. U strojů s kombinovaným chlazením je k plynovému hospodářství a olejovému hospodářství mazacího a těsnicího oleje doplněno další příslušenství pro dobývku, chlazení, filtraci a monitoring demineralizované vody satorového vinutí.



Obr. 1: Popis vybraných základních částí hydrogenerátoru [5]

Vzhledem k velkému množství komponent, které jsou provozně namáhány, je nezbytné provádět jejich pravidelnou kontrolu a údržbu. Kontroly jsou realizovány formou on-line a off-line diagnostik po celou dobu životnosti kritických částí zařízení. Součástí off-line diagnostik jsou i vizuální kontroly, zaměřené na stav jednotlivých konstrukčních částí hodnoceného odstaveného stroje. Na základě zjištěných výsledků vizuálních inspekcí jsou přijímány kroky pro odstranění zjištěných závad včetně provádění nápravných opatření.

Při vizuální inspekci jsou hodnoceny vybrané části satoru a rotoru generátoru. Současně jsou též kontrolovány i příslušenství generátorů, sběrací zařízení, budiče a další části, které mají zásadní vliv na chod stroje a v případě jejich poruchy mohou způsobit jeho neplánované dlouhodobé odstavení. Dle míry demontáže odstaveného stroje, konkrétní konstrukce a přístupnosti jednotlivých částí je vždy stanoven rámec prováděné inspekce.

S ohledem na rozsah vizuální kontroly realizované na VN točivých el. strojích, kde konstrukce čítá stovky položek, bylo v rámci tohoto článku vybráno pouze satorové vinutí, které je jednou z nejdůležitějších statických částí, podléhající vícefaktorovému namáhání.

Satorové vinutí

Za provozu generátoru se do satorového vinutí indukují napětí a pokud statorem protéká proud vzniká točivý moment [3]. Izolační systémy generátorů velkých výkonů jsou navrženy s ohledem na jejich proudové zatížení (v jednotkách až desítkách kiloampér) a zároveň vysokonapěťové namáhání, kde sdružená napětí přesahují hladinu i 20 kV. Výkonové úrovně těchto strojů jsou pak v řádech stovek megawatt. Velmi často je satorové vinutí konstruováno jako třífázové, obvykle zapojené do hvězdy.

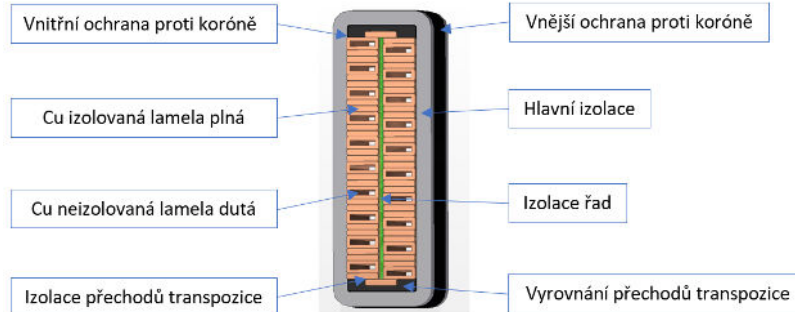
V rámci inspekce se satorové vinutí nejčastěji rozděluje na pět základních oblastí, které jsou hodnoceny samostatně a vždy vychází z konkrétního designu stroje. Hlavní částí jsou cívky a jejich izolační systém. Další hodnocenou oblastí je zaklínování satorového vinutí v drážkové části a výztužný systém čel satorového vinutí. Součástí inspekce satorového vinutí je i kon-

trola vývodních a spojovacích pasů včetně samotných vývodů statorového vinutí. Hlavní faktory ovlivňující vznik poruchového stavu vinutí jsou již u výrobce: samotný design vinutí a následně kvalita výroby. V provozu velmi záleží na prostředí, v kterém je stroj provozován a současně na celkové údržbě stroje [4].

Cívky statorového vinutí

Oproti malým strojům na nízké napětí, kde jsou cívky tvořeny velkým počtem závitů z lakového vodiče navinutého do drážek magnetického obvodu vyložené drážkovou izolací, jsou cívky vysokonapěťových strojů pro velké výkony značně odlišné. Vinutí těchto strojů je nejčastěji dvouvrstvé, v některých případech jen jednovrstvé, založené do drážek magnetického obvodu statoru. Dle konstrukčního řešení se vinutí dělí na cívkové, tvořící jeden nebo více závitů, případně půlcívkové.

U strojů velkých výkonů jsou půlcívky vyráběny jako samostatné tyče, které z důvodu snížení ztrát jsou složeny ze vzájemně izolovaných a transponovaných vodičů Roebelovou transpozicí. Vlastní základ tyče obsahuje mimo izolovaných vodičů i poměrně velké množství kompozitních materiálů viz obr. 2. Hlavní izolace je tvořena slídovým papírem prosyceným reaktoplastickou pryskyřicí a dle úrovně provozního namáhání nosnou skleněnou tkaninou případně PET nebo PEN fólií. Pro řízené elektrické pole je povrch izolace pokryt vodivými a polovodivými vrstvami, které určují jeho správné rozložení podél vinutí. Proti účinkům dynamických sil je vinutí nejen v drážkové části, ale i v čelech patřičně fixováno, aby bylo omezeno mechanické namáhání hlavní izolace a zároveň byla umožněna tepelná dilatace. Celý izolační systém také musí být vždy navržen i s ohledem na tepelné zatížení statorového vinutí. Pro zvýšení odvodu tepelných ztrát se používá přímé chlazení pomocí chladicích kanálů. Veškeré použité materiály musí odolávat všem faktorům namáhajícím statorové vinutí v průběhu provozu. Z řezu na obr. 2 je patrné celkové rozložení jednotlivých částí tyče statorového vinutí.

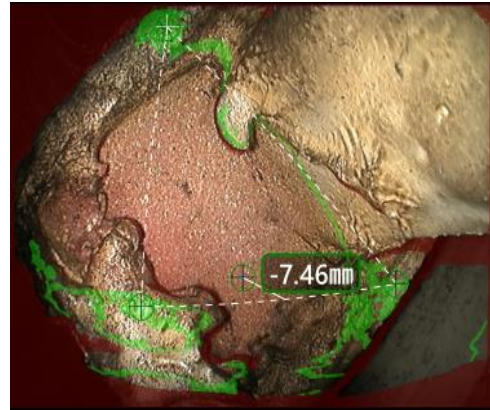


Obr. 2: Řez tyčí statoru VN synchronního generátoru s kombinovaným chlazením

Vizuálně je kontrolován stav statorového vinutí z pohledu možného mechanického a tepelného namáhání včetně známek výbojové činnosti. V drážkové části magnetického obvodu je kontrolováno zaklínování statorového vinutí drážkovými klíny, které fixují vinutí v radiálním směru. Na základě zjištění jsou následně prováděny diagnostická měření a zkoušky, které ověřují stav izolačního systému se zaměřením na zjištěné vady, jejich rozsah a vliv na následný provoz. V průběhu kontroly jsou sledována místa vykazující stopy po výbojové činnosti, případně lokálně zvýšenou teplotu izolace nebo její mechanické poškození. Důležitým bodem vizuální inspekce je i kontrola spojení spodní a horní polohy statorového vinutí. Kontrola je především zaměřena na delaminaci stěn izolačních pouzder a homogenitu jejich výplně tzv. zálivky. I zde jsou diagnostikovány stopy zvýšené teploty, trhliny v zálivce a delaminace konců hlavní izolace čel půlcívek. Pro inspekci nepřístupných míst statorového vinutí je velmi často využívána endoskopická kontrola viz obr. 3b. Při zjištění vad, které jsou na povrchu a zasahují do hloubky izolační stěny jsou realizována i 3D měření tvaru poškození, aby bylo možné posoudit rozsah a závažnost vady včetně vlivu na spolehlivost provozu stroje. Rozsah kontroly je vždy omezen na přístupné části vycházející z konstrukce stroje a úrovně demontáže.



Obr. 3a: Pohled na čela spodní polohy statorového vinutí v horní části generátoru



Obr. 3b: Detail z endoskopické kontroly výplně izolačního pouzdra

Zaklínování statorového vinutí v drážkové části

Statorové vinutí je založeno v drážkách magnetického obvodu generátoru. Proti radiálnímu a tangenciálnímu pohybu je fixováno pomocí bočních výplní, vlnovců a klínů. V rámci generálních oprav, kdy dochází k demontáži rotoru generátoru, je přístupný vnitřní průměr jádra, a proto může být realizována kontrola tuhosti zaklínování drážkových klínů. Dle konstrukčního řešení podložení drážkových klínů je kontrolována akustická odezva či dynamická odezva, nebo stlačitelnost podložení klínu. Součástí kontroly je vždy mapa rozložení klínů včetně zjištěné tuhosti. Hodnoty jsou porovnány s definovanými kritérii minimální tuhosti a je určen návrh rozsahu opravy překlínováním. Při překlínování se u vinutí s reaktoplastickým izolačním systémem současně kontroluje i boční zaklínování. Zde je kontrolována vůle mezi bočním vyložení případně boční plochou cívký a stěnou drážky.

Výztužný systém čel statorového vinutí

Výztužný systém slouží k upevnění a podepření košů čel statorového vinutí. Zajišťuje jejich mechanickou odolnost nejen v rámci běžného provozu, ale i při přechodových stavech, jako jsou změny výkonu nebo zkrat. Konstrukční řešení výztužného systému musí však umožnit dostatečné proudění chladicího média čely vinutí tak, aby nedošlo k tepelnému přetížení izolace. U výztužného systému se provádí kontrola znečištění čelních prostor statorového vinutí. Dále je kontrolováno upevnění jednotlivých rozpěrek a výztuh čel cívek vinutí statoru. Sleduje se, zda nedochází k otěru vnějších vrstev izolační stěny hlavní izolace vinutí vlivem pohybu výztuh v prostoru mezi čely jednotlivých půlcívek. Dále jsou kontrolovány bandáže a úvazy zajišťující pozici vinutí a jejich prosycení. V prostoru mezi jednotlivými čely (nejen ve fázovém rozhraní) je kontrola zaměřena na přítomnost stop po výbojové činnosti. Cílem vizuální inspekce je včas odhalit vznikající defekt a předejít celkové destrukci výztužného systému nebo poškození hlavní izolace čel statorového vinutí.

Vývodní a spojovací pasy

Vývodní a spojovací pasy jsou určeny k vzájemnému propojení jednotlivých částí statorového vinutí a vyvedení výkonu na výstupní svorky stroje. Jsou nedílnou součástí statorového vinutí a jejich kontrola probíhá obdobně jako například kontrola čel statorového vinutí. Sleduje se rozsah znečištění, stopy po výbojové činnosti, delaminace izolace a známky zvýšené teploty. Kontrola je též zaměřena na vyztužení vývodních pasů, pozici rozpěrek, utažení svorníků a bandáží.

Vývody generátoru

Vývody generátoru jsou dle konstrukčního řešení různého provedení. V některých případech, převážně u starších typů strojů, se jedná pouze o naizolovaný měděný pas procházející

izolační vývodovou deskou, na jedné straně připojený na vývodní pasy a na druhé straně na sběrné pasy nebo zapouzdržené vývody. Stroje novější konstrukce jsou velmi často osazovány unifikovanými průchodkami, které jsou u strojů velkých výkonů doplněny o systém chlazení těla měděného svorníku tak, aby mohly přenášet až desítky kiloampér. Kontaktní plochy musí být geometricky naprosto přesné a čisté. Izolace průchodek pro vysoké úrovně napětí jsou v některých případech řešeny jako kondenzátorové s vnitřními elektrodami pro řízení el. pole. Hlavní pozornost je věnována přítomnosti stop po výbojové činnosti a zvýšené teplotě izolace i kontaktních ploch. Je prováděna kontrola dotažení šroubových spojů, u strojů chlazených vodíkem nebo s kombinovaným chlazením i těsnost svorníků a přírub. Kontaktní plochy jsou především posuzovány z pohledu kvality povrchové úpravy pokovením, geometrie a sousostí s vývodními pasy.

Závěr

Společnost Centrum výzkumu Řež s.r.o. se zabývá hodnocením stavu VN hydrogenerátorů a turbogenerátorů z pohledu nálezů z vizuálních inspekcí. Na základě zjištěných odchylek je definován odhadovaný rozsah případných poškození a jejich možný dopad na následující provoz. Výstupem vizuální inspekce generátoru je technická zpráva popisující výsledky zjištění, včetně doporučení nápravných opatření. Dle charakteru zjištěných vad jsou stanoveny i návrhy pro další sledování trendu vývoje vad nebo způsob řešení jejich opravy.

Cílem diagnostických kontrol a měření je zajištění spolehlivé výroby a dodávky elektrické energie, a proto je nezbytné řešit stav jednotlivých zařízení, které se na těchto činnostech podílejí. Kontrola stavu generátoru je z pohledu spolehlivosti a bezpečného provozu elektrárny stejně důležitá, jako například kontrola turbíny, a proto je třeba jí věnovat patřičnou pozornost. Vzhledem k nezbytné míře zkušeností a znalostí pracovníků provádějící vizuální kontroly jsou v rámci skupiny techniků, diagnostiků, správců, výzkumných organizací a výrobců realizovány odborné meetingy, školení a konference. Pro unifikaci provádění vizuálních inspekcí byl vytvořen návrh metodiky s nastavením rozsahu a kritérií hodnocení stavu jednotlivých komponent. Včasná identifikace vad je téměř vždy spojena se značnou úsporou času a finančních nákladů souvisejících s jejich následným odstraněním.

Dnešní trend kontrol a měření jednotlivých částí generátorů se posouvá k robotickým inspekcím, které snižují jejich časovou a finanční náročnost. Velkou výhodou robotických inspekcí je menší rozsah demontáže stroje a možnost kombinovat více činností současně. V budoucnu se dá očekávat jejich masivnější využívání. Pravidelně prováděnou diagnostikou vedoucí na včasné odhalení vznikajících vad a cílenou údržbou je možné zvýšit bezpečnost provozu včetně prodloužení životnosti stroje.

Literatura

- [1] MENTLÍK, Václav, PIHERA, Josef, POLANSKÝ, Radek, PROSR, Pavel a TRNKA, Pavel. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 439 s ISBN 978-80-7300-232-9.
- [2] BARTOŠ, Václav, a kol. *Elektrické stroje*, Západočeská univerzita, Plzeň 2006. 139 s ISBN 80-7043-444-9.
- [3] BARTOŠ, Václav, *Teorie elektrických strojů*, Západočeská univerzita, Plzeň 2009. 229 s ISBN 978-80-7043-509-0.
- [4] STONE, Greg C., BOULTER, Edward A., CULBERT, Ian, DHIRANI, H. Electrical insulation for rotating machines, *IEEE*, 2004.643 s.
- [5] MOORE, Bill, EPRI – CEZ Advisory Meeting Follow Up, *EPRI Program 220 Generators and Auxiliaries*, Virtual Meeting 2021.