

## Analýza kvality mechatronických systémov využitím počítačovej tomografie

Peter Kačuch<sup>1</sup>, Miroslav Dovica<sup>2</sup>, Jozef Kováč<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Technical University of Košice, Letná 9 Košice, +421 55 602 3224, peter.katuch@tuke.sk

<sup>2</sup> Technical University of Košice, Letná 9 Košice, +421 55 602 3220, miroslav.dovica@tuke.sk

<sup>3</sup> Technical University of Košice, Letná 9 Košice, +421 55 602 2656, jozi.kovac@tuke.sk

**Abstrakt-** Počítačová tomografia je v oblasti medicíny dlhodobo známy pojem. V súčasnej dobe sa začal tento pojem objavovať aj v oblasti strojárskkej, automobilovej či elektrotechnickej. S touto technológiou sa stávajú nemerateľné objekty merateľné a zostavy súčiastok sú ľahko kontrolovateľné bez rozmontovania či deštruktívneho zásahu. Tento článok sa zameriava na oblasť praktického využitia počítačovej tomografie v oblasti elektrotechniky.

### I. Priemyselná počítačová tomografia

Objavom röntgenového žiarenia koncom 19. storočia sa tieto lúče začali využívať hlavne na diagnostiku a kontrolu ľudskému oku nedostupných miest. Významnou vlastnosťou tohto žiarenia je práve prechod tuhými látkami. V závislosti na absorpčných vlastnostiach látky a kumulovanej hrúbke cez ktorú žiarenie preniká sa znižuje intenzita žiarenia vychádzajúceho za skúmaným telesom. Takýmto spôsobom je možné diagnostikovať napríklad chyby v materiáloch, kontrolovať vnútorné orgány ľudského tela prípadne kontrolovať obsah batožiny na letiskách.

Až zdokonalenie výpočtovej techniky v sedemdesiatych rokoch minulého storočia umožnilo začať využívať röntgenové žiarenie pre trojrozmernú diagnostiku. Vďaka počítačovej tomografii (CT) bolo možné vytvárať virtuálne rezy objemovým modelom snímaného telesa bez jeho reálnej deštrukcie. Počítačová tomografia si našla najprv využitie najmä v oblasti medicíny. V priebehu niekoľkých rokov sa začala hojne využívať a tým bol urýchlenný aj proces jej zdokonaľovania. Vývojom sa postupne zvyšuje obrazová kvalita a rozlíšenie, znižuje radiačná záťaž a skracuje rýchlosť vyšetrenia.

V posledných rokoch sa počítačová tomografia prebojovala aj do oblasti priemyselnej. Priemyselné CT prístroje sú koncipované odlišne než medicínske tomografy. Nakoľko snímané súčiastky majú poväčšine tuhú štruktúru, nie je nutné, aby boli v statickej polohe (kedy rotuje detektor a rentgenka) a tiež nie je potrebné tak výrazne obmedzovať radiačné zaťaženie.

Priemyselné tomografy majú poväčšine rovnakú konštrukciu. Medzi zdrojom rtg žiarenia a detektorom, ktorý premieňa žiarenie na elektrický signál (čiže na informáciu), rotuje meraná súčiastka okolo zvislej osi. Počas jej rotácie sa v jednotlivých krokoch snímajú rtg obrazy, tzv. rentgenogramy. Z týchto obrazov (často niekoľko stoviek snímok) vytvorí rekonštrukčný softvér trojrozmerný model reálnej súčiastky vo forme mračna bodov. Tieto body nazývané voxely (odvodené od pojmu priestorový bod - volume pixel) sú v priestore usporiadané body, ktorým je priradená napr. 16-bitová informácia o absorpčnej vlastnosti reálnej súčiastky v tejto pozícii. Vo virtuálnom prostredí sa táto informácia zobrazuje ako určitý stupeň šedej farby. V súčasnej dobe konštrukcie priemyselných tomografov, kedy sa rozlíšenie detektora pohybuje okolo 1024x1024 pixelov predstavuje dátový súbor s informáciou o snímanom priestore cca 2GB dát. Pri tomografoch s detektormi s rozlíšením 2048x2048 pixelov je objem dát už takmer 16GB.

Dnešné priemyselné tomografy sú navrhované pre snímanie s vysokou presnosťou. Vďaka tomu sa ich využitie rozšíri z diagnostickej oblasti až do oblasti metrologie, kde ponúkajú pridanú hodnotu vo forme presných meracích prístrojov na kontrolu tvarovo veľmi komplikovaných súčiastok, ktoré doteraz nebolo možné merať inou technológiou. Ide väčšinou o súčiastky s oblasťami nedostupnými pre konvenčnú meraciu techniku. Firma Carl Zeiss ako jeden z výrobcov priemyselných tomografov nazvala túto technológiu Metrotomografia, čo je spojenie termínov metrologia a tomografia. Medzi hlavné oblasti využitia metrotomografie patria:

- testovanie:      - kvalita spojov v zostavách
- analýza pórovitosti
- analýza porúch a defektov
- inšpekcia materiálu

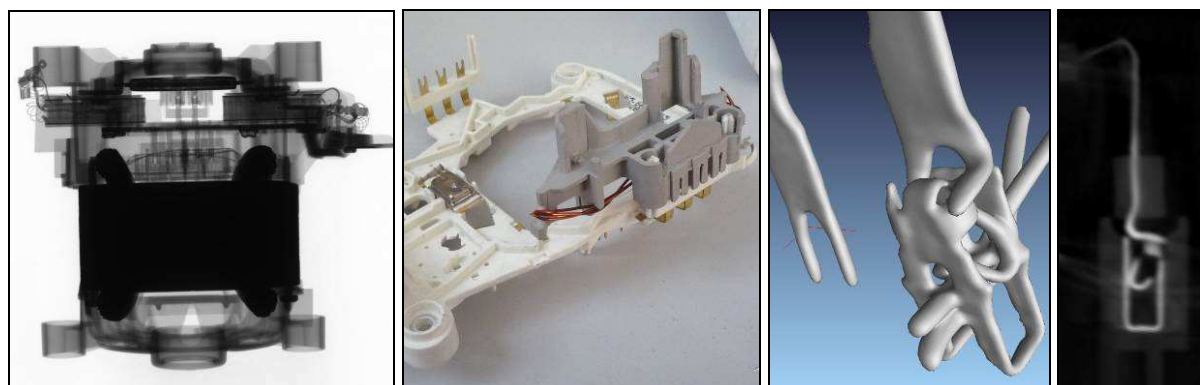
- meranie rozmerov vonkajších i vnútorných prvkov
- spätné inžinierstvo (získanie CAD modelu z reálnej súčiastky)
- porovnávanie celkovej geometrie menovitej s reálnou (zosnímanou)

## II. Inšpekcia elektrických, elektronických a mechatronických systémov

V oblasti elektrotechniky, elektroniky a mechatroniky je možné túto technológiu využiť na diagnostiku a kontrolu napríklad tvaru súčiastok, správneho umiestnenia prvkov v zostavách, celistvosti a pórovitosti materiálu, identifikácie prerušení a skratov v elektrických obvodoch atď.

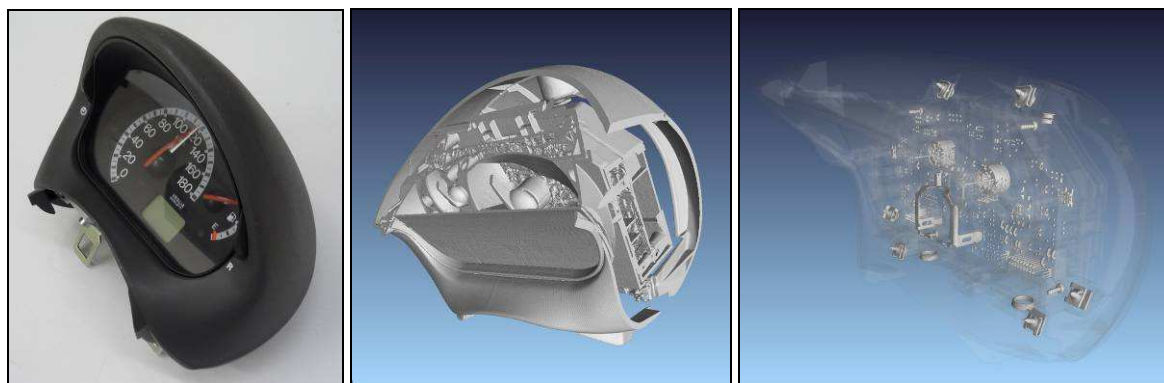
V množstvách prípadov nastáva pri výrobe ale aj po zavedení súčiastky do činnosti náhla zmena stavu, čo môže viesť až k nefunkčnosti systému či havarijnému stavu. Často nebolo možné identifikovať príčinu vzniku poruchy nedeštruktívne. Deštruktívne metódy okrem toho, že nie sú vratné a teda súčiastka nie je viac použiteľná, môžu spôsobiť, že problém nebude nájdený, nakoľko práve postupom deštruovania sa podstata problému zmení alebo úplne eliminuje.

Takéto situácie nastávajú často pri zostavovaní množstva súčiastok na výrobnéj linke, kedy nie je dodržaná správna vzájomná poloha zostavovaných dielov a pri zostavení dochádza k deformácii, ulomeniu alebo nesprávnemu polohovaniu určitých častí zostavy. Príkladom môže byť zostavovanie rotorovej a statorovej časti elektromotora, kedy vplyvom odchýlok vzájomnej polohy kontaktov dochádza k plastickej deformácii mosadzného kontaktu a jeho nedosadnutí do požadovanej pozície. Vďaka počítačovej tomografii je možné vizualizovať snímaný motor a virtuálnym odstránením súčastí, ktoré bránia vizuálnej diagnostike zobrazit' trojrozmerné iba oblasti, ktoré sú stredobodom záujmu. Mračnom nasnímaných bodov je možné prechádzať rezovými rovinami v ľubovoľnom smere alebo zobrazit' mračno bodov ako trojrozmerný obraz.



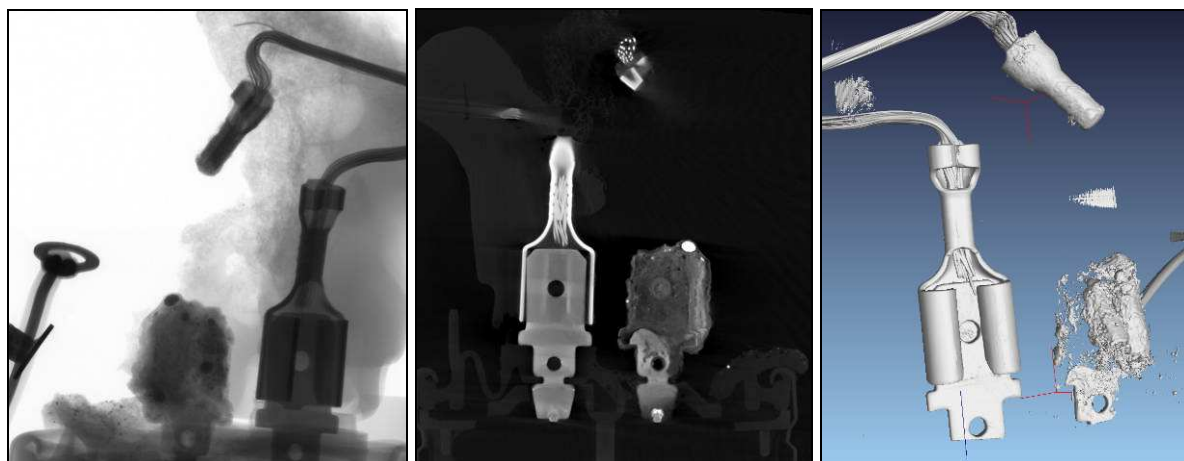
Obr. 1. Motor z práčky a) rtg snímok b) sledovaný spoj v rozobratom stave  
c) renderovaný mračno bodov spoja d) rezový obrázok miestom spoja

Práve v oblasti kontroly procesu montáže je priemyselná tomografia nenahraditeľná. Pri zostavovaní dielov v zavádzaní výroby sa stáva, že prototypy prípadne prvé výrobky slúžia na nastavenie výrobných a montážnych strojov. Diagnostika správnej polohy prvkov v zostave je veľmi dôležitá. Okrem nepriliehajúcich elektrických kontaktov často dochádza k nesprávnemu dosadnutiu mechanických častí zostavy. Väčšinou sa jedná o funkčné časti mechatronických sústav alebo o kryty zariadení či držiaky. Na obrázku je prístrojový panel osobného automobilu. V strede je pohľad na zostavu prerezanú dvoma rezovými rovinami a vpravo pohľad na kovové časti vo vnútri zostavy po spriehľadnení materiálov s nižšou hustotou.



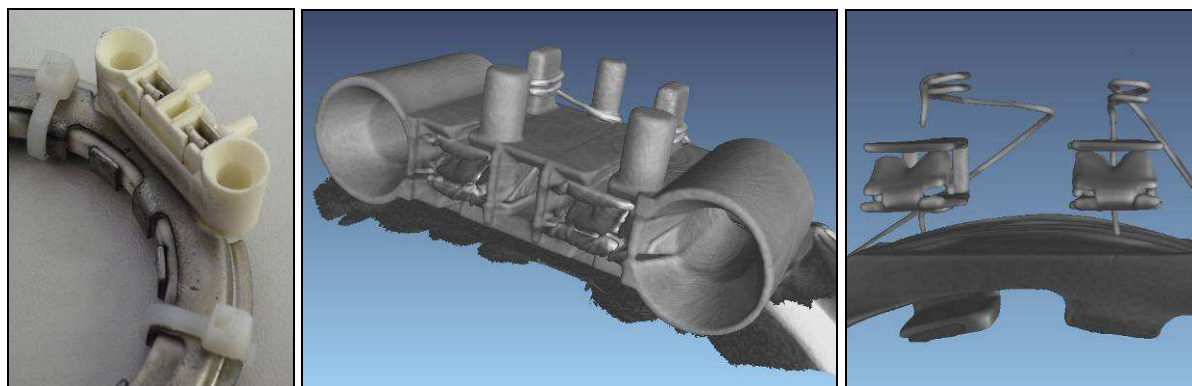
Obr. 2. Indikátor z osobného automobilu a) reálne indikátory b) virtuálny prierez zostavou, c) spriehľadnenie plastových dielov

Okrem kontroly produktov v etape prototypovania a zavádzania do výroby sa vyhodnocujú aj príčiny vzniku poruchového alebo havarijného stavu, kedy dochádza k zničeniu kritickej súčiastky alebo celku a kvôli vyšetreniu príčiny tohto stavu je nežiaduce akokoľvek porušiť tento status. Nedeštruktúrne tomografické vyšetrenie ponúka pohľad do vnútra buď klasickým analyzovaním röntgenového snímku v reálnom čase alebo z rekonštruovaného mračna bodov prehliadať skúmaný objem postupným prechodom rezovými rovinami v ľubovoľnom smere. Ďalšou možnosťou je vytvorenie renderovaného trojrozmerného obrazu s možnosťou natáčania a priestorového prechodu mračnom bodov ľubovoľne orientovanou rezovou rovinou. Na obrázku sú uvedené tieto tri možnosti na príklade spáleného kondenzátora.



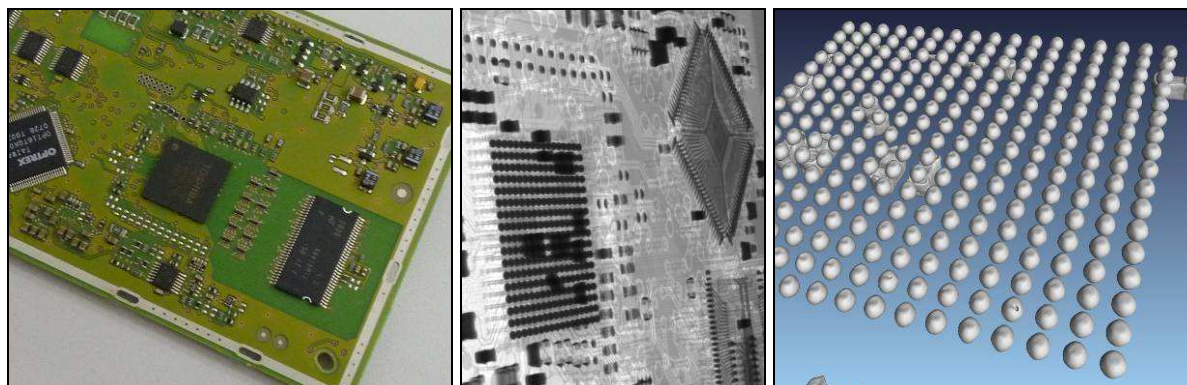
Obr. 3. Zničený kondenzátor a) rtg detailný snímok, b) rezový obrázok mračna bodov, c) renderované mračno bodov kovových dielov

Ako bolo spomínané, každému bodu v mračne bodov prislúcha hodnota reprezentovaná určitým stupňom šedej farby podľa hustoty materiálu. Všetky body z objemu mračna je možné podľa početnosti a farebnej škály zoradiť a zobrazíť vo forme histogramu. Z histogramu sa dá vyčítať zastúpenie rôznorodých materiálov v celom mračne bodov. Pri vizualizácii je možné zobrazenie niektorých materiálov potlačiť. Príkladom je tachocievka na obrázku, kde bol pri výstupnej kontrole identifikovaný problém v celistvosti medeného vinutia. Pri kontrole multimetrom sa zistilo prerušenie drôtu, avšak problém nastal pri určovaní kde a v akom rozsahu vzniklo prerušenie. Po tomografickom vyšetrení bolo miesto prerušenia nájdené virtuálnym odstránením plastového puzdra konektorov.



Obr. 4. Tachocievka a) fotografia reálnej cievky, b) mračno bodov konektora, c) separácia materiálov a vizualizáciu kovových dielov

Medzi časté objekty kontroly v elektronike patria dosky plošných spojov. Integrované obvody, ktoré sú kontaktované k doske plošných spojov po obvode, sa vo väčšine prípadov optickej kontroly sledujú pomocou mikroskopickej techniky. Integrované obvody s puzdrami, pri ktorých sa vytvára kontakt s matičnou doskou pod integrovaným obvodom je však nemožné kontrolovať bežnými optickými metódami. Často sa preto kontrolujú prístrojmi využívajúcimi rtg žiarenie. Využitím počítačovej tomografie je navyše možné v mračne bodov reprezentujúcom skúmaný objekt oddeľovať rôznorodé materiály a tým nechať zviditeľniť iba materiál spájky. Podľa tvaru guľičiek spájky je možné identifikovať, či došlo ku kontaktu s integrovaným obvodom i základnou doskou.



Obr. 5. Doska plošných spojov a) reálna doska, b) rtg snímok, c) renderovaný obrázok spájky

### III. Záver

V článku sú popísané možnosti využitia priemyselnej počítačovej tomografie v oblasti elektrotechniky, elektroniky a mechatroniky. Okrem tejto sféry je jej využitie hlavne v oblasti strojárkeho a automobilového priemyslu s možnosťou presného merania dĺžkových a uhlových rozmerov, odchýlok tvaru a polohy. Všetky merania uvedené v tomto článku boli realizované využitím tomografu Metrotom 1500 firmy Carl Zeiss umiestneného v Technologickom centre počítačovej tomografie na Technickej univerzite v Košiciach. Maximálna nepresnosť tohto stroja pri meraní je  $MPE = \pm (9 + L/50) \mu\text{m}$ .

Tento príspevok bol vypracovaný za podpory Grantovej agentúry MŠ SR pri riešení projektov VEGA 1/0022/10 "Príspevok k výskumu stratégií merania na súradnicových meracích strojoch" a KEGA "Komplexná počítačová podpora výučby súradnicovej metrológie pre školu a prax".

### References

- [1] Dr. Hubert Lettenbauer, Bernd Georgi, Dr. Daniel Weiss, "Verification of the Accuracy of CT Systems for Measuring Technology", Innovation SPECIAL Metrology 10, 2008, pp. 24-27, 2008.
- [2] Kaľuch, Peter et al. : "Počítačová tomografie pro přesné měření, defektoskopii i reverzní inženýrství.", ItCAD 6/2009. pp. 60 – 62, 2009