

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie

Ing. Pavel Žák

**SPOLEHLIVOSTNÍ RIZIKA BEZOLOVNATÝCH
DRUHŮ MONTÁŽE**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektrotechnologie a materiály

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, červenec 2012

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na katedře elektrotechnologie Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Pavel Žák
Katedra elektrotechnologie
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, Praha 6, 166 27

Školitel: Doc. Ing. Ivan Kudláček, CSc.
Katedra elektrotechnologie
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, Praha 6, 166 27

Oponenti:
.....
.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru *Elektrotechnologie a materiály* v zasedací místnosti č. Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

.....
předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Elektrotechnologie a materiály
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

Obsah

1	Současný stav problematiky	1
2	Cíle práce	3
3	Shrnutí výsledků práce	4
3.1	Problematika ECA	4
3.2	Problematika bezolovnatých pájek	7
3.3	Problematika cínových whiskerů	8
3.4	Ověření metod predikce spolehlivosti v praxi	8
4	Splnění cílů práce	11
5	Disertabilní přínosy	15
6	Závěr	16
	Seznam v tezích použité literatury	18
	Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci	20
	Seznam prací disertanta nevztahujících se k disertaci	25
	Ohlasy a recenze	27
	Summary	29

1 Současný stav problematiky

Z řady důvodů, ekonomických i technických, úroveň spolehlivosti elektrických zařízení vykazuje v posledních desetiletích dlouhodobý pokles. Ukazuje se, že s rostoucí mírou společenské spotřeby elektrických a elektronických produktů nepřímo úměrně klesala i míra spolehlivosti produktů. Systém „marketingových nanoinovací“ v podstatě stále téhož produktu v souběhu s vhodnou reklamou zastírá pravděpodobně zcela záměrně nepodporovanou spolehlivost velké většiny produktů, a to nejen produktů elektrotechnických. Hospodářská recese posledních let však nesporně přináší pozvolný nárůst zájmu o spolehlivost produktů. Příčinou jsou rostoucí problémy s dostupností a růst cen surovin nezbytných pro elektrotechnickou výrobu a klesající kupní síla obyvatelstva snižující tempo obměny elektrotechnických výrobků. Tyto faktory pravděpodobně přibrzdí tempo inovací a současně i přispějí k zájmu zákazníků o delší životnost a spolehlivost výrobků.

Významná legislativní změna týkající se spolehlivosti nastala od 1. července 2006, kdy vstoupila v platnost směrnice Evropského parlamentu a Rady Evropy 2002/95/ES o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních (RoHS) [1]. Tato směrnice omezila běžné použití šesti prvků. Z nichž je pro elektrotechnický průmysl nejvýznamnější zákaz používání olova. Olovo je používané ve více oblastech elektrotechnického průmyslu, ale zákaz uvedený v této směrnici se týká především použití olova v procesu pájení pájkami obsahujícími olovo a v procesech depozice slitinových povrchových úprav součástek a dílů.

Po dlouhou řadu let byla v elektrotechnice nejčastěji používanou metodou spojování vodičů, součástek i montáže desek plošných spojů metoda pájení slitinami na bázi cínu a olova. Tato technologie byla procesně dobře zvládnuta a díky dlouhé době používání bylo k dispozici dostatečné množství analýz zaměřených na její procesní stabilitu a provozní spolehlivost výrobků. Díky tomu bylo možné formulovat i účinné prognostické metody nezbytné pro predikci spolehlivosti v etapě vývoje a konstrukce elektrotechnických výrobků.

Kvůli této změně bylo nutné uvést do praxe nové technologie montáže a spojování v elektrotechnických zařízeních. V současné době jsou preferovány dva hlavní směry, pájení bezolovnatými pájkami a ve vybraných případech vytváření vodivých spojů použitím elektricky vodivých lepidel (dále ECA). Hlavní technologickou nevýhodou bezolovnatých pájek je vyšší teplota pájení (až 260 °C u SAC pájek), ale existují zde i další technologické problémy vyplývající z vlastností cínu. V dnešní době technologie vodivých lepených

spojů zatím není rovnocennou náhradou za spojování pájením bezolovnatými pájkami. Elektricky vodivá lepidla zatím našla využití zejména v oblastech, kde vysoká teplota pájení vylučuje užití této technologie.

Při srovnání technologií olovnatého a bezolovnatého pájení je zatím významně rozdílná úroveň spolehlivosti pájených spojů. Technologie montáže bezolovnatými pájkami je užívána relativně krátkou dobu a řada technologických problémů tohoto procesu není ještě dořešena. Spolehlivost spojů vytvořených bezolovnatými pájkami je zatím ve srovnání s pájkami obsahujícími olovo do značné míry horší. Všechny metody predikce spolehlivosti byly postavené na analýze a následné syntéze poznatků z experimentálních výsledků laboratorních zkoušek i dat z praktického provozu výrobků realizovaných technologiemi SnPb. Pro použití u bezolovnatých technologií se ukázaly dosavadní predikční metody jako velmi nespolehlivé.

Dosud bylo provedeno jen velmi málo experimentů založených na zrychlených zkouškách spolehlivosti a byla teprve získána první data o spolehlivosti v provozním prostředí. Díky těmto údajům již můžeme začít pokusně posuzovat spolehlivost produktů s kratším životním cyklem a tyto odhady spolehlivosti nejsou zatím příliš optimistické. Spolehlivost bezolovnatých technologií spojování je zatím značně nižší ve srovnání s technologií SnPb. Navíc do roku 2011 směrnice RoHS platila pro oblast spotřební elektroniky (tedy elektroniky s relativně krátkým životním cyklem). V roce 2011 byla směrnice RoHS inovována s číslem 2011/65/EU [2] a rozšířena o medicínské aplikace a řídicí nebo telekomunikační systémy, tedy o aplikace, u kterých při poruše může dojít k zásadním ohrožením finančních zdrojů i lidských životů. Stejně tak je pro tyto aplikace typický delší životní cyklus, např. komponenty jaderných elektráren, které jsou velmi často plánovány a testovány na požadovanou životnost 40 let. Ovšem spolehlivostní zkoušky na zařízení investiční nebo speciální povahy realizovaných bezolovnatými technologiemi jsou zatím spíše výjimkou, a to vesměs z důvodů vysokých finančních nákladů. Věrohodnost údajů o spolehlivosti produktů, na které jsou oprávněně kladeny vysoké požadavky na dlouhodobou spolehlivou funkci je dnes velice nízká a experimentálně nedoložená.

Elektrotechnická produkce v dnešní době obsahuje široké spektrum typů výrobků. Jedná se o výrobky od čistě spotřební povahy (např. mobilní telefon, hrací konzole, apod.) přes produkci náročnějších aplikací (automobil, průmyslová PC) až po zařízení investiční nebo speciální povahy a další aplikace s vysokými nároky na dlouhodobou spolehlivost.

Toto rozdělení je vhodné pro rozlišení stupně technologické náročnosti aplikací, jejich vyžadované kvality a spolehlivosti a následně i náklady na jejich spolehlivost. Na konkrétním druhu produkce závisí finanční náklady na vývoj a výrobu zařízení a tím následně i použité technologie a úroveň zajištěné spolehlivosti. Problémy spolehlivosti je nezbytně prioritně řešit především pro výrobky s předpokládanou vyšší životností nebo zvýšenými nároky na spolehlivost. Spolehlivost ostatních výrobků, zejména spíše spotřebního charakteru bude tímto způsobem následně vyřešena odvozeně, pouze změnou kritérií predikce v segmentu požadované délky životnosti výrobku.

2 Cíle práce

Na základě výše uvedeného současného stavu problematiky spolehlivosti elektrických zařízení i z konkrétních potřeb výrobní praxe v oblasti prognostiky spolehlivosti, stability, kontroly a validace procesů elektricky vodivého spojování bylo možno formulovat základní hypotézu práce:

„Použití moderních technologií montáže nemusí vést ke vzniku produktu s vyšší spolehlivostí.“

Na základě provedených analýz a této hypotézy byly formulovány následující cíle disertační práce:

1. Vymezení vlivu bezolovnatých technologií montáže na spolehlivosti elektrických produktů.
2. Analýza prognostických metod používaných ke stanovení odhadů spolehlivosti elektrického produktu s ohledem na jeho vývoj a konstrukci před přijetím směrnice RoHS a po nabytí platnosti této směrnice.
3. Průběžná aplikace získaných poznatků v podnikové sféře v reálném čase.

Výsledky disertační práce by měly být využitelné ke korektnímu posuzování míry spolehlivosti ve vývojové, konstrukční i výrobní praxi při aplikaci bezolovnatých technologií a ke zvýšení spolehlivosti elektrotechnických výrobků.

3 Shrnutí výsledků práce

V rámci disertační práce byla provedena ucelená řada zkoušek spolehlivosti bezolovnatých druhů montáže a to jak v laboratorních, tak i provozních podmínkách. Hlavním cílem všech provedených zkoušek a jejich výsledků je analýza možných důsledků přechodu na bezolovnatou technologii montáže pro spolehlivost elektrických zařízení. Důsledky tohoto technologického přechodu byly analyzovány pomocí následujících experimentů a analýz:

- zkoušek spolehlivosti základních typů elektricky vodivých lepidel (jednosložkové a dvousložkové ECA) a tří typů pájek (SnPb pájka a dva typy SAC pájek);
- experimentů s laboratorním pěstováním cínových whiskerů v dynamickém režimu;
- analýzou spolehlivosti reálných zařízení v laboratorních i provozních podmínkách.

Vzhledem k závažnosti problematiky byly všechny výsledky využity ke kritické analýze metodik predikce spolehlivosti jako prvního kroku při vývoji a konstrukci spolehlivých elektrických zařízení. Cílem bylo posoudit možnosti jejich uplatnění i za významně změněných technologických podmínek, jak z vzhledem k technologii bezolovnatého pájení, tak i vzhledem používání relativně nové technologie spojování pomocí elektricky vodivých lepidel.

Souběžně byly ve spolupráci s externími zadavateli provedeny spolehlivostní zkoušky na zvláště vyráběných vzorcích elektronických zařízení a expertní analýzy stávajícího a nově projektovaného řídicího a bezpečnostního systému. Získané výsledky nebyly právě povzbudivé a v obou případech vedly zadavatele k přijetí dokumentů upravujícího podmínky a meze provozního použití zařízení vyrobeného pomocí technologie bezolovnaté montáže (v tomto případě zařízení investiční nebo speciální povahy).

3.1 Problematika ECA

V problematice ECA byly zkoumány dvě hlavní oblasti, oblast jejich technologické aplikace a oblast jejich klimatické odolnosti:

- V oblasti technologické aplikace ECA byla zásadním poznatkem zjištěná výrazná nehomogenita spojů vytvořených oběma typy ECA. Tato nehomogenita je způsobená procesy míchání, plnění a vytvrzování ECA a projevuje se výraznou pórovitostí a zvýšeným obsahem plyných vměstků. Vlivy nehomogenit uvnitř vytvořených spojů se projevují zejména v prostředí se zvýšenou relativní vlhkostí, sníženým atmosféric-

kým tlakem a znečištěnou průmyslovou atmosférou. V těchto podmínkách se značně zvyšuje elektrický odpor spoje. V rámci experimentů bylo zjištěno, že hlavní vliv na míru vnitřní nehomogenity má použitý profil vytvrzení (ECA vytvrzené při nižší teplotě vytvrzení vykazuje vyšší nehomogenitu) a dále druh ECA (nehomogenita je výraznější u jednosložkového ECA). Vliv doby expirace ECA má překvapivě druhotný vliv.

- Na nehomogenitu spoje z elektrického hlediska mají vliv i samotné vlastnosti ECA jako suspenze nevodivého pojiva (matrice lepidla) a vodivé složky. Tvar, velikost a hmotnost vodivého plniva (zatím většinou Ag) do jisté míry rozhoduje o rychlosti jeho usazování a tím i časové délce zachování homogenity vlastností soustavy pojivo – plnivo. Se stoupajícím množstvím plniva totiž klesají reálné hodnoty adheze i koheze lepidla jako takového, přičemž elektrické vlastnosti mohou být naopak dočasně lepší. Zcela jistě na zlepšení homogenity déle skladovaného dvousložkového lepidla nepostačí promíchání při jeho míchání s tvrdidlem. Navíc u jednosložkového lepidla toto míchání by vlastně nemělo být nutné a pak nelze vyloučit změny vlastností suspenze obou složek lepidla.
- Jako nepříliš vhodná se jeví adjustace lepidla k technologickému použití. Zvláště pro použití v neautomatizované výrobě by autor považoval za vyspělejší formu adjustace do formy jednorázových PE dispenzerů k omezení jevu vnesení vzduchových bublin do lepidla při jeho nanášení i míchání. Navíc je tato adjustace trhu lepidel již zcela běžná, stejně jako použití labyrintového míchacího nástavce.
- Druhá oblast poznatků se týká chování ECA během stárnutí při zvýšené teplotě (zkoušky suchým teplem, ale i zkouška vlhkým teplem, atd.). Během stárnutí při zvýšené teplotě bylo zjištěno, že se zásadně odlišuje chování jednosložkového a dvousložkového ECA, kdy elektrický odpor spojů vytvořených pomocí dvousložkového ECA na začátku tohoto stárnutí prudce klesá, zatímco odpor jednosložkového ECA většinu doby pozvolně roste. Lze se oprávněně domnívat, že tento prudký pokles elektrického odporu během stárnutí při zvýšené teplotě úzce souvisí s procesy dotvrzování ECA, které je i při dodržení udaného vytvrzovacího profilu reálně nedotvrzené. Tato skutečnost však nemusí být vždy na závadu.

Z pohledu dlouhodobé spolehlivosti stojí dále za zmínku určité rozpory mezi doporučenými rozsahy teplot použití výrobcem obou vzorků ECA. Rozsah teplot použití

u jednosložkového ECA AX 20 je dle katalogového listu $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, maximální teplota pak $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 1,5 hodiny. Rozsah pracovních teplot dvousložkového ECA AX 12LVT není v katalogovém listu uveden. Udávaný rozsah pracovních teplot u ECA AX 20 je při dlouhodobém používání nereálný, a to zejména z následujících důvodů:

- Doporučené profily vytvrzení tohoto ECA jsou na teplotních hladinách $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, resp. $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ v případě průběžné pece (vrcholová teplota profilu). Maximální teplota použití $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ je tedy na hladině maximální vytvrzovací teploty, výrobce tedy předpokládá dotvrzování ECA během fáze jeho použití. Tato teplota však může, dle autorových zkoušek, přejít velmi rychle ve fázi degradace. Doporučený rozsah je navíc výrazně nad teplotou skelného přechodu běžné podložky DPS. Obtížné je i korektní odůvodnění proč pracovní teplota leží i výrazně nad teplotou skelného přechodu daného ECA AX 20 ($92\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]) i dvousložkového ECA AX 12LVT ($95\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4]).
- Z provedených zkoušek je patrná degradace již při $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, jak z určených ukazatelů např. průběhu intenzity poruch, tak i z poklesu průměrné velikosti síly odtrhu ve smyku (pokles o $22,4\%$). To pak znamená, že tzv. dotvrzení ECA může být pro jeho užité vlastnosti i spolehlivost nepříznivé a může degradovat jeho mechanické i elektrické parametry. Dále lze čekat, že při vyšších teplotách použití dojde k ještě výrazně horším výsledkům, neboť nelze předpokládat, že by struktura ECA nepodléhala Arrheniovu zákonu.
- Zároveň byly úspěšně realizovány laboratorní experimenty k odplynění ECA a tím snížení vnitřní pórovitosti pomocí vystavení namíchané směsi, případně i naplněného dispenzeru, působení sníženého tlaku.

Poslední oblast výzkumu spolehlivosti ECA byla zaměřena na vliv korozních produktů na Cu plochách na DPS, kde byly realizovány experimenty s aktivací povrchu DPS, která vedla ke snížení přechodového odporu lepených spojů. Všechny poznatky lze shrnout do následujících bodů:

- Nezpochybnitelným důvodem k aplikaci ECA je nízká teplota jejich vytvrzení, která je činí obtížně nahraditelnými pro řadu aplikací.
- ECA jsou technologicky obtížně aplikovatelná z hlediska eliminace voidů (plynných vměstků) při míchání i vytvrzení vlastního spoje. Voidy snižují klimatickou i mechanickou odolnost spoje a mohou vést k závažným poruchám spoje a nezpochybnitelně

ovlivňují výsledky zkoušek i výslednou dlouhodobou stabilitu vlastností spoje a jeho spolehlivost. Vytvrzená ECA jsou prozatím z hlediska působení klimatických vlivů poměrně nestabilní vodivé struktury.

- Pro vytvoření elektricky i mechanicky kvalitního spoje je ve velké většině případů nutná aktivace povrchu Cu nebo jeho pokovení Au apod.
- Nevytvrzená ECA kladou poměrně vysoké nároky na dopravní a skladovací podmínky.
- Výroba ECA klade na jejich výrobce vysoké nároky, zejména na výrobu pojiva, tj. organické pryskyřice, její dlouhodobou stabilitu a korektně udávané podmínky jejího vytvrzení. Kvalita a spolehlivost lepeného spoje závisí převážně na výrobcu lepidla. Pro úspěšnou technologickou aplikaci ECA v průmyslu je také rozhodující dlouhodobá stabilita vlastností jednotlivých dodávek.

3.2 Problematika bezolovnatých pájek

Z hlediska elektrických vlastností mají pájky dobrou časovou stabilitu a změny parametrů jednotlivých pájek jsou velmi podobné jak u SnPb, tak i u obou SAC pájek. Z hlediska mechanických vlastností jsou bezolovnaté pájky podstatně křehčí než SnPb pájky a obsahují větší množství voidů:

- Větší křehkost pájky je dána složením jednotlivých pájecích slitin a zejména vlastnostmi čistého Sn (u pájek se spíše jedná o cín s malou příměsí „nečistot“).
- Větší množství voidů pak je způsobeno vyšší teplotou tavení bezolovnatých pájek, kdy plynné vměstky nemohou v průběhu chladnutí roztavené pájky dostatečně rychle uniknout (zvláště při pájení vlnou). Spoj pájený bezolovnatou technologií již z hlediska metalurgických vlastností vykazuje vyšší riziko vzniku nehomogenit, než tomu bylo u pájek s obsahem Pb. Voidy mají zásadní vliv na dlouhodobou spolehlivost výsledného pájeného spoje.
- Vyšší pájecí teplota bezolovnatých pájek má zásadní vliv na teplotní zatížení pájených součástí i běžné podložky DPS.
- Zásadním problémem u bezolovnatých pájek je riziko růstu whiskerů, s nímž se při konstrukci obvykle nepočítá a zvláště u produktů s vyšší hustotou montáže může být tento jev velmi rizikový a determinující spolehlivost i životnost elektrického zařízení v praktickém provozu.

3.3 Problematika cínových whiskerů

V rámci přípravy disertační práce byla vypracována metodika cyklického dynamického namáhání vzorků vedoucí k akcelerovanému růstu cínových whiskerů v případech, kdy mohou být pro jejich růst vhodné podmínky. Whiskery byly takto vypěstovány jak na vrstvách čistého cínu, tak i na vzorcích s žárově nanesenou vrstvou pájek, a to jak bezolovnatých, ale i vzorcích s eutektické pájky SnPb. Zároveň se autor zaměřil na vyhledávání a detekci whiskerů na površích běžných průmyslových aplikací a vyhledávání nejrizikovějších komponent a materiálových kombinací. Příkladem vysoce rizikových aplikací jsou běžně používané násuvné konektory typu FASTON, které mnohdy obsahují cínové whiskery nebo jejich zárodky již v době, kdy jsou montovány do zařízení. Přitom konektory FASTON jsou masově používány nejen v automobilní technice nebo spotřebním zboží, kde možná růst whiskerů zatím nevádí, ale i v řídicí, automatizační a zabezpečovací technice, kde jejich výskyt může mít poměrně nepříjemné, často až fatální následky.

V průběhu celé řady poruchových analýz provedených v rámci této práce bylo prokázáno, že i zařízení pájená ještě SnPb pájkami mohou obsahovat (a většinou také obsahují) komponenty s povrchovými úpravami typu čistý cín a stejně tak, že za mimořádně příznivých podmínek cínové whiskery mohou růst i na SnPb pájkách s vyšším obsahem cínu. Je nutno důrazně upozornit na skutečnost, že mechanismus růstu whiskerů není v současné době možno zahrnout mezi faktory použitelnými pro prognostiku spolehlivosti z důvodů nedostatečného stupně jeho vědeckého poznání.

3.4 Ověření metod predikce spolehlivosti v praxi

Pro ověření vztahů mezi výsledky predikce spolehlivosti a spolehlivostí reálných zařízení v provozu měl autor mimořádnou příležitost aktivně se podílet na práci týmu plánujícího provedení a vyhodnocení rozsáhlých spolehlivostních zkoušek dvou typů zařízení dálkového měření a monitorace investiční povahy konstruovaných na bázi multiprocesorové mikropočítačové aplikace určené do velmi náročných klimatických podmínek. Odhady spolehlivosti zařízení byly provedeny podle normy MIL-HDBK-217F z poslední edice a obdobné normy (metoda podobná filosofii Nokia) používané zadavatelem obou zkoušek pro zařízení této povahy (též určené původně pro montáž SnPb) a činil u prvního typu zařízení $\lambda \leq 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ pro poruchy ztráty funkce zařízení (sériový model). Spolehlivostní zkouška probíhala v praktických podmínkách v terénu s tím, že veškerá zkoušená

zařízení byla realizována bezolovnatým pájením, část spojů byla, pro ověření jeho vlastností, provedena lepením vodivým lepidlem na bázi fenolického epoxidu s příměsí 50 % Ag vloček. Lepidlo dodal výrobci zadavatel zkoušky. Pro výrobu obou souborů byly použity součástky, které prošly stanovenými a v praxi exaktně ověřenými třídícími zkouškami pro minimalizaci období časných poruch. Každé zařízení bylo ve své podstatě autonomním prvkem zkoušky s tím, že bylo vybaveno testovacím programem se střední úrovní detekce a určení poruchy. V plné míře byla každá vzniklá porucha zaznamenávána v centrální jednotce zkoušky asi z 60 % již s identifikací typu poruchy a v plné míře co do času od počátku zkoušky. Zkouška probíhala jeden kalendářní rok tak, aby byl podle možnosti specifikován vliv klimatu ročního období na průběh zkoušky. Jako srovnávací soubor byla použita identická zařízení realizovaná klasickou technologií montáže a vyrobená ze stejného souboru součástek, pocházejícího vždy ze stejné dodávky. Počet zařízení byl v obou souborech identický, tj. po padesáti kusech sestav (SnPb+SAC) vyrobených na stejném technologickém zařízení a stejnými pracovníky. Pouze pro pájení vlnou bezolovnatou pájkou SAC byla vyměněna pájecí vana s náplní SAC.

Výsledky zkoušky v podstatě potvrdily předpoklady, se kterými byla tato zkoušky plánována:

- ECA na bázi fenolických epoxidových pryskyřic nejsou zřejmě prozatím použitelná v zařízení pracujícím ve ztížených klimatických podmínkách a jen s výhradou v zařízení investiční povahy pracujícím v normálních podmínkách. Navíc není zatím možno připustit jejich aplikaci v částech zařízení s vysokými nároky na spolehlivost, ale spíše v částech indikačních a pomocných.
- Skutečná spolehlivost zařízení vyrobeného bezolovnatou technologií (ECA a pájení SAC) byla nižší než odhadovaná dle výše uvedených norem a činila $\lambda = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$. Prokázána byla tím také nutnost stanovení korekčních koeficientů a autor bude pravděpodobně vyzván ke spolupráci při jejich dalším stanovování.
- Cínové whiskery byly autorem v zařízení nalezeny a byly identifikovány jako část příčin nespolehlivé funkce (příčiny zkratů v poměru 42 % ku 58 % ostatním příčinám poruch).
- Kontrolní soubor provedený klasickou technologií SnPb splnil podmínky odhadu spolehlivosti s intenzitou poruch $\lambda \leq 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$.

Výsledkem zkoušky byl dočasný zákaz použití bezolovnatých technologií vydaný zada-

vatelem zkoušek pro všechna zařízení investiční povahy v rámci jeho působnosti a posléze byl rozšířen vyšším administrativním rozhodnutím i do dalších citlivých segmentů elektrotechniky. ECA budou nadále rozvíjena ve spolu práci se zákazníkem s cílem nahradit speciální druhy pájek z drahých kovů (Ga, In apod.)

Dalším výsledkem zkoušky bylo pozastavení používání odhadů spolehlivosti dle dosavadních norem nebo postupů pro zařízení vyráběná při respektování bezolovnatých technologií až do doby stanovení a verifikace korekčních koeficientů [42], [43].

Na základě nepříliš příznivých výsledků předchozí zkoušky byl zadavatel ochoten finančně zajistit opakování zkoušky spolehlivosti s vyloučením aplikace ECA, které byly pro tento druh zařízení a dané klimatické podmínky označeny jako nepoužitelná. Zadavatel pro druhou zkoušku určil jiný typ zařízení (100 ks), které je již vyráběno a provozováno po dobu tří let a bylo doposud vyráběno technologií SnPb s dosavadní dosaženou hodnotou intenzity poruch $\lambda = 2 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$. Pro výrobu zkušební souboru byly použity součástky, které prošly stanovenými třídícími zkouškami pro minimalizaci období časných poruch. Odhad spolehlivosti zařízení byl proveden již dříve, obdobně jako u prvního zařízení a činil $\lambda \leq 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ pro poruchy ztráty funkce zařízení (sériový model). Spolehlivostní zkouška probíhala za stejných podmínek s tím, že veškerá zkoušená zařízení byla vyrobena pájením pájkou SAC. Každé zařízení bylo opět autonomním prvkem zkoušky s tím, že bylo vybaveno testovacím programem k určení poruchy. Zkouška probíhala opět jeden kalendářní rok tak, aby byl podle možnosti specifikován vliv ročního období na průběh zkoušky. Jako srovnávací hodnota intenzity poruch byla použita výše uvedená hodnota získaná z provozu více než dvou set kusů zařízení po dobu tří let [38], [40], [41]. Výsledky zkoušky souboru zařízení pájených bezolovnatou pájkou SAC byly následující:

- Spolehlivost zařízení byla nižší než odhadovaná dle výše uvedených prognostických metod a činila $\lambda \leq 5,1 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$. Značný podíl na poruchách zařízení měly kondenzátory s plastovým dielektrikem, kondenzátory elektrolytické, v menší míře polovodičové struktury vyšší integrace, ale zejména očekávané trhliny v pájených spojích.
- Cínové whiskery opět byly v zařízení nalezeny, byly identifikovány jako část příčin nespolehlivé funkce (většinou jako zkratky mezi pájenými body v poměru 44 % ku 56 % ostatním příčinám poruch).

Zkouška opět prokázala praktickou nepoužitelnost dosavadních prognostických metod pro oblast bezolovnatého pájení i lepení ECA. Současně prokázala technickou i praktickou

rozporuplnost legislativního opatření k vyloučení olova z pájecího procesu. Zcela zásadním výsledkem této zkoušky bylo pozastavení používání bezolovnatých technologií pájení a ECA na zařízení dané kategorie určené pro celý rezort zákazníka s platností i pro případné dovozy obdobných zařízení.

Zkušební soubory obou zkoušek je možno považovat za homogenní a stejnorodé. Testovaná zařízení v obou zkouškách byla vyrobena v prostředí stabilizované výroby ze stejnorodých souborů součástí navíc podrobených ověřeným postupům třídících zkoušek pro zkrácení období časných poruch. Veškerá zkoušená zařízení v obou zkouškách jsou svou funkční povahou i konstrukcí srovnatelná, tj. jedná se distribuovaný terénní zkušební systém se SW řízením, automatickým testováním stavu, dálkovou diagnostikou i přenosem informací. Údržba zařízení byla prováděna v servisním středisku s tím, že systém je ze spolehlivostního hlediska považován za sériový model. Zkušební podmínky byly vždy závislé na konkrétních klimatických podmínkách v daném ročním období. Tato skutečnost byla jediným náhodným jevem v celém zkušebním provozu, ale naopak zákazník na základě svých zkušeností trval na zkoušce praktické, která dává poměrně často pozitivnější a reálnější výsledky než urychlené laboratorní spolehlivostní zkoušky. Problematika odhadů spolehlivosti dle dosavadních prognostických metodik nebo postupů pro zařízení vyráběná při respektování bezolovnatých technologií bude dále řešena s cílem získání podkladů pro stanovení a verifikaci korekčních koeficientů pro dosavadní praxi ověřené metody.

4 Splnění cílů práce

Kontrola plnění cílů disertační práce vychází z jejich formulace v kapitole 2. Zobecněním získaných poznatků je možné konstatovat splnění stanovených cílů:

1. *Vymezení vlivu bezolovnatých technologií montáže na spolehlivosti elektrických produktů.*

Z hlediska spolehlivosti elektrických výrobků bylo specifikováno a experimentálně odzkoušeno, že posun technologie směrem k naprosté eliminaci olova má zcela zásadní vliv na výslednou spolehlivost zařízení. Tato spolehlivost významnou měrou poklesla z následujících důvodů:

- Významného zvýšení pájecí teplot vinou vyššího bodu tavení bezolovnatých pájek.

- Absence některých součástí určených pro zvýšené pájecí teploty na trhu i absence vhodné cenově dostupné náhrady laminátu typu FR 4 s tím, že vysoké překračování skelného přechodu při pájení není žádoucí z hlediska spolehlivosti produktu.
- Nehomogenity pájených spojů, křehkosti pájecích slitin (resp. pájení téměř čistým cínem, ztížení vizuální kontroly pájeného spoje apod.).
- Tvorby cínových whiskerů a výskytu cínového moru.

Snaha o plošné nahrazení pájek ECA není dosud úspěšná. Z autorových experimentů je patrné, že lepené spoje vykazují nižší spolehlivost než spoje pájené, a to zejména v prostředí zhoršených klimatických podmínek (vysoká relativní vlhkost, průmyslová atmosféra se sirnými exhalacemi atd.).

Spolehlivost zařízení se zavedením bezolovnatých technologií tedy významně klesá. Bezolovnaté technologie montáže se zatím příliš nehodí pro zařízení investiční nebo zvláštní povahy a požadovanou korektní funkcí po delší časový interval.

2. *Analýza prognostických metod používaných ke stanovení odhadů spolehlivosti elektrického produktu s ohledem na jeho vývoj a konstrukci před přijetím směrnice RoHS a po nabytí platnosti této směrnice.*

Bylo zjištěno, že výpovědní hodnota metod predikce spolehlivosti je nepříznivě ovlivněna přechodem na bezolovnaté technologie montáže. Je nutno více zohlednit spolehlivost spojů. Zatím však i metodiky, které zohledňují spolehlivost elektricky vodičových spojů, nejsou schopny ve stávající podobě zohlednit nové metody spojování a ve většině případů jsou založeny pouze na spolehlivostních datech SnPb pájek. Byly definovány tato zjištění:

- U spotřební elektroniky není zatím nutné řešit otázku spolehlivosti, zde je z marketingového hlediska spíše nežádoucí. Analýza poruch by lehce mohla několikanásobně převýšit cenu vývoje a výroby daného produktu. Navíc by tato operace také prodloužila etapu návrhu což je při současné rychlosti inovačního cyklu nemyslitelné. Většina podniků tento problém bude řešit na účet zákazníka zvýšením finančního objemu fondu garanční rezervy. Tento způsob je v současnosti zcela běžný.
- U produktů investiční techniky metodiky predikce spolehlivosti není možné s dostatečnou výrokovou přesností použít pro přechod na bezolovnaté pájení

nebo lepení. Lze použít s vysokou mírou nejistoty některou z novějších metodik predikce zejména metodiku FIDES, případně v méně náročných aplikacích metodiku IEC-TR-62380. Navíc je nutno dodat, že některé skupiny výrobků zatím nespadají do oblasti působnosti direktivy RoHS (např. servery). Tento fakt zjevně ilustruje nedostatečnou spolehlivost nových technologií montáže [1] i vědomí exekutivy o určité kontroverznosti současného rozhodnutí.

- U řídicích, medicínských nebo bezpečnostních systémů, zejména pak u implantovaných lékařských přístrojů, vesmírných aplikací a aplikací zajišťujících bezpečnost státu je není zatím možné využít metod predikce spolehlivosti. Tyto aplikace vyžadují vysoký stupeň spolehlivosti a některé aplikace přímo vylučují servisní zásahy – např. vesmírné aplikace. Navíc u těchto systémů se zatím ani v budoucnu nedá zaručit úspěšný přechod na bezolovnatou technologii montáže [1].

3. Průběžná aplikace získaných poznatků v podnikové sféře v reálném čase.

Poznatky získané studiem dané problematiky a získané výsledky byly do podnikové sféry průběžně aplikovány v podobě expertních analýz pro dva subjekty, v podobě dlouhodobé spolupráce s jedním výrobním podnikem a řadou zákazníků. První expertní analýza spolehlivosti byla zaměřena na provedení zkoušek spolehlivosti inteligentních kontrolérů pro záložní zdroje elektrické energie. Výsledky těchto analýz byly publikovány v technické zprávě [55]. Další čtyři expertní posudky byly vyhotoveny pro jiný subjekt a byly zaměřeny na spolehlivost bezpečnostních systémů založených jak na olovnaté, tak i bezolovnaté technologii montáže a podmínky vzniku whiskerů a případná rizika jimi způsobená [53], [54], [32]. Spolupráce s výrobním podnikem byla zaměřena na posouzení reálnosti přechodu na bezolovnaté pájení u výrobků komunikační a speciální produkce pro zahraniční subjekty, které výslovně nespadají do působnosti směrnice RoHS.

Disertační práce je zaměřena na zhodnocení metod predikce spolehlivosti v době přechodu na bezolovnatou technologii montáže. Bylo experimentálně prokázáno, že se zejména s přechodem na technologie bezolovnaté montáže výrazně změnily ukazatele spolehlivosti jednotlivých komponent, DPS a celých zařízení. Jedná se zejména o tři příčiny:

1. První příčinou je vliv bezolovnatých technologií montáže na elektronické prvky, zde se jedná zejména o deformace DPS a jednotlivých dílů součástek vlivem vyšších

procesních teplot, zničení součástky nebo snížení jejich spolehlivosti vlivem vyšších procesních teplot a tvorba cínových whiskerů.

2. Druhou příčinou významné snížení věrohodnosti metod predikce spolehlivosti je vliv elektricky vodivých spojů. Při podrobnějším prozkoumání jednotlivých metod predikce spolehlivosti je zřejmé, že zejména starší metodiky predikce spolehlivosti neuvážují spolehlivost vodivého spojení mezi součástkami. Přitom je vodivý spoj nejčastěji se vyskytující „součástkou“ výrobku. Navíc, jak bylo prokázáno výše, ECA i pájky vykazují zcela rozdílné chování, je tedy nutné začít oddělovat tyto dvě metody vodivého spojování.
3. Poslední příčinou je, že většina metodik predikce je zaměřena pouze na období s konstantní intenzitou poruch. Přitom v dnešní době mnohé komponenty zařízení již mají svůj životní cyklus bez období konstantní intenzity poruch. Toto je možné dokumentovat např. na výsledcích realizovaných zkoušek spolehlivosti ECA, ale i na informacích z obchodních a servisních organizací.

K základní hypotéze práce formulované ve 2. kapitole, lze říci, že se jí podařilo potvrdit a to zejména v bodech:

1. Problematika spolehlivosti skutečně není v současné době základní prioritou velké řady výrobců elektrotechnických produktů. S tímto trendem se autor však ve své praxi setkal i v oblasti investiční a speciální techniky. Podcenění významu spolehlivosti vede k neekologickému plýtvání surovinovými zdroji, finančními prostředky zákazníků a navíc může v konečném důsledku způsobit škody na zdraví a majetku.
2. Prognostické metody spolehlivosti používané před legislativním zavedením povinnosti implementace bezolovnatých technologií spojování a povrchových úprav výrobků skutečně nejsou bez dalšího výzkumu a zejména korektních spolehlivostních zkoušek aplikovatelné při prognózách spolehlivosti produktů vyvíjených a konstruovaných s cílem vyrábět je bezolovnatými technologiemi. Toto tvrzení bylo prokázáno poměrně rozsáhlými spolehlivostními zkouškami.
3. Legislativně kodifikovaná povinnost zavedení bezolovnatých technologií nebyla před zavedením dostatečně vědecky dopracována z hlediska vlivu na spolehlivost produktů vyráběných s pomocí těchto technologií. Je i nadále nutno doplnit tuto mezeru a metodami vědecké analýzy experimentálních poznatků a syntézou výsledků formulovat pravidla pro jejich účelnou implementaci do výrobní praxe.

5 Disertabilní přínosy

Za hlavní disertabilní přínos práce autor považuje ověření platnosti doposud užívaných metodik predikce spolehlivosti pro technologie bezolovnatého pájení a lepení elektricky vodivými lepidly (ECA). Z výsledků dvou poměrně rozsáhlých zkoušek spolehlivosti provedených v praktických provozních podmínkách vždy po dobu jednoho roku bylo prokázáno, že je vyloučeno použití stávajících metodik (např. i MIL-HDBK-217F) pro predikci spolehlivosti bezolovnatých technologií, včetně predikce spolehlivosti pro spojování ECA. Zde je prokázáno, že pro tento případ dává predikční metoda zcela nevěrohodné výsledky a je tedy nepoužitelná.

Ani v případě technologie bezolovnatého pájení nejsou metody predikce použitelné bez dalších výzkumů a zobecnění výsledků prováděných spolehlivostních zkoušek. Tato disproporce výsledků predikčních metod není pouze problémem realizace vlastních pájecích bodů, ale i důsledkem vyššího tepelného zatížení některých součástí při pájecím procesu (zde je zřejmá nepřipravenost výrobců součástí na změnu technologie pájení). Lze tedy říci, že pro tento účel není v současné době k dispozici použitelná metodika.

Autorovy závěry podporují výsledky dvou poměrně rozsáhlých zkoušek spolehlivosti. V případě první zkoušky, kde byla srovnávána spolehlivost stejného zařízení vyrobeného za stejných logistických podmínek pouze s rozdílem použité technologie, výsledná spolehlivost 50 kusů zařízení pájeného SnPb byla lepší než její prognostický odhad. V druhé polovině souboru pájeného SAC a částí součástí lepenými ECA byla výsledná spolehlivost o přibližně dva řády horší oproti prognostickému odhadu. Podmínky roční provozní zkoušky byly pro celý soubor 100 kusů zařízení identické co do času, klimatických i provozních podmínek nasazení.

V případě druhé zkoušky bylo testováno 100 kusů zařízení vyrobeného bezolovnatým pájením pájkou SAC, proti několika 100 kusů zařízení vyráběného již po dobu přibližně tří let. I zde byl výsledek obdobný, výsledná spolehlivost byla opět o přibližně dva řády nižší proti prognóze.

Lze tedy s vysokou výrokovou jistotou říci, že použití stávajících dostupných predikčních metod pro korektní odhady spolehlivosti elektrických zařízení vyrobených bezolovnatou technologií není možné.

Za vedlejší disertabilní přínos autor považuje potvrzení závěrů práce týkající se problematiky cínových whiskerů [31]. Ve všech zkoušených zařízeních pájených pájkou SAC

byly zkratky způsobené whiskery identifikovány. Obdobně autor identifikoval výskyt cínových whiskerů v technologických zařízeních dvou zákazníků. V obou případech whiskery působily obtížně identifikovatelné poruchy způsobující výpadky některých funkcí zařízení.

Za další vedlejší disertabilní přínos považuje autor výsledky ze souboru klimatických a mechanických zkoušek ECA prováděných při dodržení technologie obvyklé ve výrobním podniku. Zde lze říci, že použití ECA bez jeho odplynění před aplikací je značně rizikové pro jeho spolehlivost nejen z hlediska změn klimatických podmínek, ale i z hlediska logistiky zařízení. Výskyt plynných vměstků při výše uvedené spolehlivostní zkoušce v praktickém provozu významně snižuje spolehlivost spoje. Jako obdobný problém se ukázala nutnost aktivace povrchu Cu plošek při delším, i když technologicky korektním skladování neosazených DPS.

Autor experimentálně prokázal významný a nepříznivý rozdíl ve výsledné reálné spolehlivosti testovaného zařízení vyrobeného pomocí bezolovnatých technologií a výsledky její predikce stávajícími metodikami. Nové metodiky predikce spolehlivosti je nezbytné formulovat pro oblast investiční a speciální techniky včetně aplikací pro medicínu. Zatímco investiční technika zatím nepodléhá platnosti směrnice RoHS, aplikace pro medicínu již do působnosti této směrnice spadají a dle autorových zkušeností představují významné riziko pro zdraví a životy lidí. Rozšíření platnosti směrnice RoHS v části bezolovnatého pájení do oblasti medicínských aplikací bez výjimky je do jisté míry morální i právní hazard s obtížně domyslitelnými výsledky. U spotřební elektroniky není zatím nutné akutně řešit otázku spolehlivosti vzhledem k jiným podmínkám použití i podstatně nižší požadované životnosti ovlivněné rychlejším inovačním cyklem.

6 Závěr

Objektivně je nutno říci, že Směrnice RoHS je zcela nesporným přínosem pro zlepšení ochrany životního prostředí. Již jen snaha po eliminaci kadmia nebo rtuti je významným pozitivním zásahem do životního prostředí. Zákaz používání olova v pájkách je jistě myšlen dobře, ale nebyly zde ze strany odborníků vypracovávajících příslušné odstavce směrnice, ani ze strany schvalující exekutivy domyšleny skutečné dopady takového zákazu.

Přechod na bezolovnaté spojování přinesl zatím více problémů než pozitivních přínosů. V podnikové praxi v podstatě znesnadnil vytvoření spolehlivého pájeného spoje a

téměř znemožnil jednoduchou vizuální kontrolu jeho kvality (nejčastější stížnost z praxe). Dalším problémem je nadměrná koroze pájecích zařízení pro pájení vlnou. Bezolovnaté pájky svou vyšší agresivitou podstatně rychleji opotřebují jak pájecí vany, tak i vrtule čerpadel a další doplňky, což přináší zvýšení nákladů na pájení. Dalším problémem je jistá rigidita výrobců součástek. Pouze část součástek je dnes schopna snést podstatně vyšší tepelný šok při pájení přetavením nebo vlnou. Tato skutečnost není příliš příznivá pro budoucí spolehlivost vyráběných zařízení neboť zatím platnost Arrheniova (příp. Eyringova) zákona nelze legislativně ovlivnit.

Samostatnou kapitolou je vlastnost některých kovů tvořit za jistých podmínek vodivé whiskery, nepříznivá je skutečnost, že cín mezi ně také patří. Možnosti technologicky ovlivnit tvorbu cínových whiskerů na pájkách i galvanicky nanášených cínových vrstvách je nedostatečná. Autor se při svých výzkumech na zařízení v praktickém použití setkal s případy, kdy tento jev významně ovlivňoval spolehlivou funkci zařízení a výpadky funkcí znesnadňoval jejich obsluhu. V tomto případě se zdá, že odborníci připravující tuto část směrnice RoHS rizika tohoto jevu podcenili.

Na pováženou je však rozšíření platnosti směrnice RoHS v části bezolovnatého pájení do oblasti medicínských aplikací (výrobci autoelektroniky si odklad platnosti vymohli). Autor tuto skutečnost považuje za ohrožení lidského života v okamžicích, kdy jsou již publikovány fatální důsledky takových aplikací, např. selhání bezolovnatě pájených implantovaných přístrojů. Právní důsledky mohou být v takovém případě pro výrobce dodávajícího požadavek RoHS velmi nepříjemné, zvláště po zavedení institutu „psychické újmy“ do právního systému.

Nutno říci, že pájení zůstane zřejmě i nadále stále nejčastěji používanou metodou spojování v elektrotechnickém průmyslu. Na metalurgickém výzkumu je nyní vývoj bezolovnatých pájecích slitin s pájecí teplotou a dalšími vlastnostmi blízcími se klasické olovnaté pájce. Z publikačních pramenů je zřejmé, že tento vývoj probíhá značně rychle a je oprávněná naděje dosažení pozitivních výsledků. Stejně tak se ukázalo, že není zatím možné pájky plně nahradit vodivými lepenými spoji. Pro ně zůstanou vyhrazeny aplikace vyžadující minimalizaci teploty při vytváření vodivého spoje apod. Obě montážní technologie budou v budoucnosti existovat vedle sebe a velmi účelně navzájem se doplňovat. Další vývoj ECA by se měl zaměřit na stabilitu vlastního pojiva a dále na minimalizaci sedimentace vodivého plniva. Řešením budou zřejmě částice plniva vytvořené pomocí

nanotechnologií, ale současně s vyřešením jejich smáčivosti v pojivu.

Souběžně s řešením technologických aspektů procesu montáže bezolovnatými montážními technologiemi je nutné zvýšit úsilí o jejich dlouhodobou stabilitu a spolehlivost. Tento proces je stále ještě samém počátku a zejména dlouhodobá stabilita takto vytvořených spojů není dostatečná. Přechod na bezolovnaté technologie zatím ztížil výrobu spolehlivých zařízení.

Podstatně vyšší úsilí bude nutno věnovat metodikám predikce spolehlivosti a jejich korekcím vzhledem ke změnám technologií. Dnes jsou tyto metody v podstatě nepoužitelné, neboť byly po dlouhá léta precizovány pro zcela jiné technologické podmínky. Bez pozitivních výsledků v této oblasti nebude možný úplný přechod na bezolovnaté technologie. Pro elektrická zařízení určená do zhoršených klimatických podmínek, zařízení dlouhodobě skladovaná, pro speciální zařízení a výzbrojní systémy to jejich zákazníci zatím v žádném případě nepřipustí a nadále budou trvat na olovnatém pájení. Přesvědčit je mohou pouze pozitivní výsledky zkoušek spolehlivosti, a jak se zatím zdá, jsou do jisté míry ochotni na těchto zkouškách se aktivně účastnit. Výsledky těchto zkoušek by jednak přispěly ke korekcím koeficientů predikčních metod, ale také ke zpětnému zvýšení spolehlivosti bezolovnatými technologiemi vyráběné spotřební a zejména výpočetní techniky. Spotřební technika je v současnosti asijskými výrobci vyráběná v obou provedeních a v porovnání např. základních desek PC vyrobených bezolovnatým pájením jejich spolehlivost významně poklesla.

Za zcela zásadní problém autor považuje korekci predikčních metod pro nové technologie v co nejkratším časovém horizontu. Výpadek možnosti predikce pro bezolovnaté technologie omezuje výrobce investiční techniky ve všech oblastech jejího využití a limituje je v zavádění bezolovnatých technologií.

Dalším důležitým úkolem je zvýšit společenskou prestiž spolehlivých výrobků, alespoň v některých segmentech elektrických produktů s cílem minimalizovat odpad, který je nutno recyklovat a minimalizovat spotřebu celé řady stále hůře dostupných surovin. Autor se domnívá, že při pomnutí dalších, často zcela nepodstatných kritérií, např. stále opakované „modernosti“, je spolehlivý výrobek dlouhodobě plnící očekávání zákazníka zároveň i výrobkem ekologickým.

Seznam v tezích použité literatury

- [1] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/95/ES ze dne 27. ledna 2003 o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních.* 2003. s. 19–32.
- [2] *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2011/65/EU ze dne 8. června 2011 o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních.* 2011. s. 88–110.
- [3] PLÁČEK, Martin. *Teplotně-mechanická analýza elektricky vodivých lepidel.* Praha: 2012. Diplomová práce. ČVUT FEL, Katedra elektrotechnologie.
- [4] Emepox Ltd. Elpox AX 12 LVT (two-component ECA).
- [5] ŽÁK, Pavel. *Vyhodnocení spolehlivosti zvláštního zařízení AMS.* Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab SP 02/2011. 2011. s. 68.
- [6] ŽÁK, Pavel. *Poruchové analýzy prvků ze spolehlivostní zkoušky zařízení AMS.* Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab PA 01/2011. 2011. s. 36.
- [7] ŽÁK, Pavel. *Vyhodnocení spolehlivosti monitorovacího zařízení AMX za první tři roky provozu.* Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab SP 03/2012. 2012. s. 38.
- [8] ŽÁK, Pavel. *Spolehlivost zařízení AMX pájeného SAC.* Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab SP 04/2012. 2012. s. 42.
- [9] ŽÁK, Pavel. *Poruchová analýza vzorků AMX předaných zákazníkem.* Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab PA 01/2012. 2012. s. 37.
- [10] KUDLÁČEK, Ivan a Pavel ŽÁK. *Spolehlivostní zkouška inteligentních kontrolerů InteliCompact a InteliLite.* Praha: ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektrotechnologie. Technická zpráva č. K313/2008/01. 2008. s. 5.
- [11] KUDLÁČEK, Ivan, Marek TUČAN a Pavel ŽÁK. *Problematika Tin Whiskers - část 1.* Praha: ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektrotechnologie. Technická zpráva č. K313/2011/01. 2011. s. 57.
- [12] KUDLÁČEK, Ivan, Marek TUČAN a Pavel ŽÁK. *Problematika Tin Whiskers - část 2.* Praha: ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektrotechnologie. Technická zpráva č. K313/2011/02. 2011. s. 22.
- [13] KUDLÁČEK, Ivan a Pavel ŽÁK. *Diagnostika změn na povrchu násuvných konektorů typu Faston.* Praha: ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektrotechnologie. Technická zpráva č. K313/2010/01. 2010. s. 16.
- [14] ŽÁK, Pavel. *Tvorba whiskerů při měkkém pájení v elektronice.* Praha: ČVUT v Praze, 2008. Diplomová práce. ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektrotechnologie.

Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

Publikace v impaktovaných časopisech

Publikace v recenzovaných časopisech

- [1] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. Combined Accelerated Climatic Tests of Electrically Conductive Adhesives. *ElectroScope*. 2010, roč. 2010, č. 3, s. 1–3. ISSN 1802-4564. In: <http://147.228.94.30/>.
- [2] TUČAN, Marek a Pavel ŽÁK. Influence of Climatic Cycles on Properties of Leadfree Solders. *Acta Polytechnica*. 2010, roč. 2010, č. 4, s. 75–78. ISSN 1210-2709.

Patenty

Publikace excerpované WOS

- [1] ŽÁK, Pavel a Ivan KUDLÁČEK. *Prognostika spolehlivosti v období aplikace bezolovnatých technologií montáže*. In: Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. s. 801–806. ISBN 978-80-214-4514-7.
- [2] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *ECA Resistance Measurement – Calibration for Temperature Change*. In: 35th International Spring Seminar on Electronics Technology. Vídeň: Technická Univerzita, 2012. s. 1–5. ISBN 978-3-85465-015-7.
- [3] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN, Jan HÁJEK a Ivan KUDLÁČEK. *Diagnostics of Whiskers Using Expert System*. In: 35th International Spring Seminar on Electronics Technology. Vídeň: Technická Univerzita, 2012. s. 1–4. ISBN 978-3-85465-015-7.
- [4] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *Tin coating of connectors - reliability risk for electrical equipment*. In: 34th International Spring Seminar on Electronics Technology. Košice: Technická Univerzita Košice, 2011. s. 229–233. ISBN 978-1-4577-2111-3.
- [5] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *Lead-free Car Electronics According to Updated ELV Directive*. In: Applied Electronic 2011. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 413–416. ISBN 978-80-7043-987-6.
- [6] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *Post-curing behavior of two-component Electrically Conductive Adhesive*. In: 34th International Spring Seminar on Electronics Technology. Košice: Technická Univerzita Košice, 2011. s. 258–261. ISBN 978-1-4577-2111-3.
- [7] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Jan URBÁNEK. *Homogeneity of Joints Made of Electrically Conductive Adhesive*. In: 34th International Spring Seminar on Electronics Technology. Košice: Technická Univerzita Košice, 2011. s. 225–228. ISBN 978-1-4577-2111-3.

- [8] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Jan URBÁNEK. *Mechanical stress tests of SMT attachments*. In: 34th International Spring Seminar on Electronics Technology. Košice: Technická Univerzita Košice, 2011. s. 262–266. ISBN 978-1-4577-2111-3.
- [9] TUČAN, Marek, Pavel ŽÁK a Jan URBÁNEK. *Možnosti a rizika využití elektricky vodivých lepidel ve výkonové elektronice*. In: Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. s. 1–4. ISBN 978-80-248-2393-5.
- [10] TUČAN, Marek, Pavel ŽÁK a Jan URBÁNEK. *Degradation of Two-Compound Electrically Conductive Adhesive in Relation to Curing Temperature Profile*. In: Applied Electronic 2011. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 393–396. ISBN 978-80-7043-987-6.
- [11] ŽÁK, Pavel a Ivan KUDLÁČEK. *Výskyt whiskerů rizikem pro funkci elektrárny*. In: Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2010. s. 711–716. ISBN 978-80-214-4094-4.
- [12] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *Effects of operating conditions on automotive electronics*. In: Applied Electronic 2010. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. s. 379–382. ISBN 978-80-7043-865-7.
- [13] TUČAN, Marek a Pavel ŽÁK. *Vlivy provozních podmínek na elektroniku obnovitelných zdrojů*. In: Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2010. s. 345–350. ISBN 978-80-214-4094-4.
- [14] TUČAN, Marek, Pavel ŽÁK a Jan URBÁNEK. *Preparation of Vibration Tests of Electrically Conductive Adhesives and Leadfree Solders*. In: Applied Electronic 2010. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. s. 355–358. ISBN 978-80-7043-865-7.

Publikace ostatní

- [1] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *Impact of RoHS 2.0 on Electronic Industry*. In: Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2012 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2012. ISBN 978-80-214-4303-7.
- [2] ŽÁK, Pavel a Marek TUČAN. *Voids in Joints Made of Electrically Conductive Adhesive*. In: 16th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2012. s. 1–4. ISBN 978-80-01-05043-9.
- [3] KREISLOVÁ, Kateřina, Hana GEIPLOVÁ, Roman LIČBINSKÝ a Pavel ŽÁK. *Corrosivity of road tunnel microclimate*. In: EUROCORR 2012. Turecko: 2012.
- [4] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *Estimation of Weibull Distribution Parameters in Reliability Applications*. In: Diagnostika '11. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 193–197. ISBN 978-80-261-0020-1.

- [5] ŽÁK, Pavel a Marek TUČAN. *Estimation Accuracy of Weibull Distribution Parameters in Reliability Practice*. In: POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2011. s. 1–5. ISBN 978-80-01-04806-1.
- [6] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *Whisker Formation - Reliability Risk for Telecommunication Application*. In: Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2011 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2011. s. 33–38. ISBN 978-80-214-4303-7.
- [7] HÁJEK, Jan, Pavel ŽÁK, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *Diagnostics of Whiskers Using Expert System*. In: Diagnostika '11. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 9–12. ISBN 978-80-261-0020-1.
- [8] KUDLÁČEK, Ivan, Pavel ŽÁK a P. KORBEL. *Obrazová analýza korozních kuponů vystavených nízkoagresivním prostředím*. In: Proceedings of the PETrA 2011 Conference. Brno: Česká společnost chemického inženýrství, 2011. s. 1–7. ISBN 978-80-02-02293-0.
- [9] TUČAN, Marek, Pavel ŽÁK a Ivan KUDLÁČEK. *Detecting Non-Homogeneity of Electrically Conductive Adhesives*. In: Diagnostika '11. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 53–56. ISBN 978-80-261-0020-1.
- [10] TUČAN, Marek, Pavel ŽÁK a Jan URBÁNEK. *Long-Term Climatic Tests of Components for Electronics*. In: Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2011 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2011. s. 91–94. ISBN 978-80-214-4303-7.
- [11] ŽÁK, Pavel. *Vliv prostředí na spolehlivost elektrotechnických zařízení*. Praha: ČVUT v Praze, 2010. Doktorandské minimum. ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektrotechnologie.
- [12] ŽÁK, Pavel a Ivan KUDLÁČEK. *Processing of reliability data sets containing extreme values*. In: Workshop 2010. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010. s. 238–239. ISBN 978-80-01-04513-8.
- [13] ŽÁK, Pavel, Ivan KUDLÁČEK a M. ČOPJAN. *Galvanické povrchy Sn z hlediska spolehlivosti elektrického zařízení*. In: Sborník 43. celostátního aktivu galvanizérů. Jihlava: Česká společnost pro povrchové úpravy, 2010. s. 10–13. ISBN 978-80-903709-4-4.
- [14] ŽÁK, Pavel a Marek TUČAN. *Effect of Climatic Cycling on Reliability of Electrically Conductive Adhesives*. In: POSTER 2010 - Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2010. s. 1–5. ISBN 978-80-01-04544-2.
- [15] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *Combined Accelerated Climatic Tests Of Electrically Conductive Adhesive*. In: Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2010 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEL, 2010. s. 349–352. ISBN 978-80-214-4138-5.
- [16] TUČAN, Marek a Pavel ŽÁK. *Influence of Climatic Cycles on Properties of Leadfree Solders*. In: POSTER 2010 - Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2010. s. 1–4. ISBN 978-80-01-04544-2.

- [17] TUČAN, Marek, Pavel ŽÁK a Jan URBÁNEK. *Climatic Testing of Technologies for Renewable Energy Sources*. In: Sborník konference ELEN 2010. Praha: ČVUT v Praze, FEL, Katedra energetiky, 2010. s. 1–6. ISBN 978-80-254-8089-2.
- [18] TUČAN, Marek a Pavel ŽÁK. *Influence of Climatic Cycles on Properties of Leadfree Solders*. In: Cena nadace ČEZ o nejlepší vysokoškolský vědeckotechnický projekt. Praha: ČEZ, a.s., 2010. s. 1–6.
- [19] TUČAN, Marek, Pavel ŽÁK a Jan URBÁNEK. *Properties of Leadfree Solders and Electrically Conductive Adhesives Subjected to Climatic Tests*. In: Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2010 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEI, 2010. s. 319–322. ISBN 978-80-214-4138-5.
- [20] ŽÁK, Pavel. *Reliability Risks of tin-rich alloys for Electronic Industry*. In: Poster 2009. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2009. s. 1–4.
- [21] ŽÁK, Pavel a Ivan KUDLÁČEK. *Tin Whiskers - Reliability Risk For Electronic Equipment*. In: Umwelteinflüsse erfassen, simulieren, bewerten. Pfintal (Berghausen): Gesellschaft für Umweltsimulation e.V., 2009. s. 239–251. ISBN 978-3-9810472-7-1.
- [22] ŽÁK, Pavel a Ivan KUDLÁČEK. *Cínové whiskery - riziko pro spolehlivost elektro-technických výrobků*. In: Diagnostika '09. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. s. 220–223. ISBN 978-80-7043-793-3.
- [23] ŽÁK, Pavel a Ivan KUDLÁČEK. *Technological Problems and Logistics of Electrically Conductive Adhesives*. In: ETE'2009. Bruxelles: Belgian Society of Mechanical and Environmental Engineering, 2009. s. 1–4.
- [24] ŽÁK, Pavel, Ivan KUDLÁČEK a Jan BÍNA. *Příspěvek k ověřování spolehlivosti DPS s lepenými spoji*. In: Diagnostika '09. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. s. 224–227. ISBN 978-80-7043-793-3.
- [25] KREISLOVÁ, Kateřina, Jaroslava BENEŠOVÁ a Pavel ŽÁK. *Korozní odolnost elektrolytických povlaků*. In: Progresivní a netradiční technologie povrchových úprav. Jaroměř: Centrum pro povrchové úpravy, 2009. s. 17–21. ISBN 978-80-904502-0-2.
- [26] KREISLOVÁ, Kateřina a Pavel ŽÁK. *Základní vlastnosti elektrolytických povlaků ovlivňujících jejich korozní odolnost a funkčnost*. In: Sborník Přednášek 51. Medzinárodnej galvanickej konferencii. Bratislava: STU v Bratislavě Fakulta chemickej a potravinárskej technológie, 2009. s. 26–34. ISBN 978-80-227-3098-3.
- [27] TUČAN, Marek a Pavel ŽÁK. *Vibrační a klimatické zkoušky pájených a lepených spojů*. In: Elektrotechnologie 2009. Praha: ČVUT, 2009. s. –. ISBN 978-80-01-04379-0.
- [28] ŽÁK, Pavel. *Tvorba whiskerů při měkkém pájení v elektronice*. In: Cena nadace ČEZ o nejlepší vysokoškolský vědeckotechnický projekt. Praha: ČEZ, 2008. s. 1–9.
- [29] ŽÁK, Pavel, Ivan KUDLÁČEK, Marek Tučan a Jan Urbánek. *The relationship between the reliability of electrical products and environmental disposal of electrical waste*. In: Workshop 2011. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. s. 1–8.

- [30] ŽÁK, Pavel. *Spolehlivost jako podmnožina jakosti produktu*. In: Sborník z konference vzdělání a ekonomika jako hlavní determinanty hospodářského růstu. Plzeň: Západočeská universita, 2009. s. 132–140. ISBN 978-80-7043-788-9.
- [31] ŽÁK, Pavel. *Tvorba whiskerů při měkkém pájení v elektronice*. Praha: ČVUT v Praze, 2008. Diplomová práce. ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektrotechnologie.
- [32] KUDLÁČEK, Ivan a Pavel ŽÁK. *Diagnostika změn na povrchu násuvných konektorů typu Faston*. Praha: ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektrotechnologie. Technická zpráva č. K313/2010/01. 2010. s. 16.
- [33] ŽÁK, Pavel a Ivan KUDLÁČEK. *Spolehlivost elektrických zařízení 2.díl - Vliv prostředí na spolehlivost elektrotechnických zařízení*. Praha: SVÚOM Praha a.s., 2010. 60 s. ISBN 978-80-903933-8-7.
- [34] ŽÁK, Pavel a Ivan KUDLÁČEK. *Spolehlivost elektrických zařízení*. 1. vyd, Praha: SVÚOM Praha a.s., 2009. 23 s. ISBN 978-80-903933-5-6.
- [35] ŽÁK, Pavel a Ivan KUDLÁČEK. *Zařízení pro laboratorní tvorbu cínových whiskerů*. [Funkční vzorek]. 2010.
- [36] ŽÁK, Pavel a Ivan KUDLÁČEK. *Makrofotografické zařízení s řízeným osvětlením*. [Funkční vzorek]. 2010.
- [37] TUČAN, Marek, Pavel ŽÁK a Jan URBÁNEK. *Přípravek pro vibrační zkoušky lepených spojů*. [Funkční vzorek]. 2010.
- [38] ŽÁK, Pavel. *Vyhodnocení spolehlivosti monitorovacího zařízení AMX za první tři roky provozu*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab SP 03/2012. 2012. s. 38.
- [39] ŽÁK, Pavel. *Vyhodnocení spolehlivostních zkoušek zařízení AMS a AMX a doporučení k jejich další výrobě*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab SP 05/2012. 2012. s. 76.
- [40] ŽÁK, Pavel. *Spolehlivost zařízení AMX pájeného SAC*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab SP 04/2012. 2012. s. 42.
- [41] ŽÁK, Pavel. *Poruchová analýza vzorků AMX předaných zákazníkem*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab PA 01/2012. 2012. s. 37.
- [42] ŽÁK, Pavel. *Vyhodnocení spolehlivosti zvláštního zařízení AMS*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab SP 02/2011. 2011. s. 68.
- [43] ŽÁK, Pavel. *Poruchové analýzy prvků ze spolehlivostní zkoušky zařízení AMS*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab PA 01/2011. 2011. s. 36.
- [44] ŽÁK, Pavel. *Experimenty s nanášením epoxidových pryskyřic*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab SP 2/2011. 2011. s. 49.
- [45] ŽÁK, Pavel. *Hodnocení spolehlivosti a kontrola výsledků periodických zkoušek*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab SP 19/2011. 2011. s. 32.
- [46] ŽÁK, Pavel. *Zkoušky konektorů FASTON*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab TZ 04/2011. 2011. s. 41.

- [47] ŽÁK, Pavel. *Posouzení elektrických režimů součástek a dimenzování spojů DPS*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab SP 18/2010. 2010. s. 35.
- [48] ŽÁK, Pavel. *Spolehlivost hlavního rozvaděče*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab SP 23/2010. 2010. s. 36.
- [49] ŽÁK, Pavel. *Příčiny poruch pájených desek plošných spojů a analýza desek dodávka Vrchlabí*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab PA 23/2009. 2009. s. 29.
- [50] ŽÁK, Pavel. *Poruchová analýza DPS ATÚ – náhradní díly*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab SP 09/2009. 2009. s. 13.
- [51] ŽÁK, Pavel. *Poruchová analýza skládaných styroflexových kondenzátorů SMD*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab PA 15/2008. 2008. s. 12.
- [52] ŽÁK, Pavel. *Posouzení použitelnosti kadmiovaných spojovacích prvků v nové výrobě (RoHS)*. Praha: SCH Lab. Technická zpráva č. SCH Lab PA 12/2008. 2008. s. 8.
- [53] KUDLÁČEK, Ivan, Marek TUČAN a Pavel ŽÁK. *Problematika Tin Whiskers - část 1*. Praha: ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektrotechnologie. Technická zpráva č. K313/2011/01. 2011. s. 57.
- [54] KUDLÁČEK, Ivan, Marek TUČAN a Pavel ŽÁK. *Problematika Tin Whiskers - část 2*. Praha: ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektrotechnologie. Technická zpráva č. K313/2011/02. 2011. s. 22.
- [55] KUDLÁČEK, Ivan a Pavel ŽÁK. *Spolehlivostní zkouška inteligentních kontrolerů InteliCompact a InteliLite*. Praha: ČVUT v Praze, FEL, Katedra elektrotechnologie. Technická zpráva č. K313/2008/01. 2008. s. 5.

Seznam prací disertanta nevztahujících se k disertaci

Publikace v impaktovaných časopisech

Publikace v recenzovaných časopisech

- [1] ŽÁK, Pavel, Ivan KUDLÁČEK a Vratislav ŽÁK. Recyklace malých elektrotechnických a elektronických výrobků v současných ekonomických podmínkách. *WASTE FORUM*. 2010, roč. 2010, č. 5, s. 513–518. ISSN 1804-0195.

Patenty

Publikace excerptované WOS

- [1] ŽÁK, Pavel, Daniel HRDINA a Ivan KUDLÁČEK. *Porovnání technických a ekologických parametrů fotovoltaických panelů*. In: Proceedings of the 13th International

Scientific Conference EPE 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. s. 523–528. ISBN 978-80-214-4514-7.

- [2] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *Comparison of Technical and Environmental Parameters of Photovoltaic Panels*. In: 35th International Spring Seminar on Electronics Technology. Vídeň: Technická Univerzita, 2012. s. 1–5. ISBN 978-3-85465-015-7.
- [3] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *Recyklace funkčních prvků solární elektrárny*. In: Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. s. 1–4. ISBN 978-80-248-2393-5.

Publikace ostatní

- [1] HROUDA, Pavel a Pavel Žák. *Ekonomicky optimalizovaná implementace normy ČSN EN ISO 9001 do podnikové praxe*. In: Manažment podnikania a vecí verejných. 2012.
- [2] ŽÁK, Pavel a Pavel HROUDA. *Comparison of Environmental and Economical Parameters of Photovoltaic Systems Using LCA*. In: Manažment podnikania a vecí verejných. 2012.
- [3] ŽÁK, Pavel. *Ecological aspects of lead-free mounting technology in terms of LCA*. In: 16th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2012. s. 1–4. ISBN 978-80-01-05043-9.
- [4] ŽÁK, Pavel a Elena KIZIMOVA. *History of Radio Receivers in Czech Republic*. In: 16th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2012. s. 1–7. ISBN 978-80-01-05043-9.
- [5] ŽÁK, Pavel. *Analýza životního cyklu fotovoltaických elektráren s ohledem na recyklaci funkčních prvků*. In: Cena nadace ČEZ o nejlepší vysokoškolský vědeckotechnický projekt. Praha: ČEZ, a.s., 2011. s. 1–7.
- [6] ŽÁK, Pavel a Marek TUČAN. *190 Years with Galvanometers*. In: POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2011. s. 1–4. ISBN 978-80-01-04806-1.
- [7] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN a Ivan KUDLÁČEK. *Contribution to the study of lead-free technology in terms of LCA*. In: Diagnostika '11. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 198–201. ISBN 978-80-261-0020-1.
- [8] HÁJEK, Jan, Pavel ŽÁK a Ivan KUDLÁČEK. *Life Cycle Assessment of Photovoltaic System in Intelligent Buildings*. In: Diagnostika '11. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 109–112. ISBN 978-80-261-0020-1.
- [9] TUČAN, Marek a Pavel ŽÁK. *Recycling of electronic parts and devices*. In: POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2011. s. 1–4. ISBN 978-80-01-04806-1.

- [10] TUČAN, Marek a Pavel ŽÁK. *Power Station Vydra*. In: POSTER 2010 - Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2010. s. 1–4. ISBN 978-80-01-04544-2.
- [11] KNOTKOVÁ, D., Kateřina KREISLOVÁ, A. ŠVEC, Ivan KUDLÁČEK a Pavel ŽÁK. *Ochrana kovových technických památek proti atmosférické korozi*. In: Sborník Konference konzervátorů-restaurátorů. Brno: Technické muzeum, 2009. s. 17–21. ISBN 80-86413-62-4.
- [12] MASTNÝ, Tomáš a Pavel ŽÁK. *Obecné aspekty jakosti procesů - TQM*. In: Ošetřovatelství v pohybu. Příbram: SZŠ a VOŠ zdravotnická Příbram, 2006. s. 139–143. ISBN 80-239-6690-1.

Ohlasy a recenze

- [1] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN and Jan URBÁNEK. *Mechanical stress tests of SMT attachments*. In: 34th International Spring Seminar on Electronics Technology. Košice: Technická Univerzita Košice, 2011. s. 262–266. ISBN 978-1-4577-2111-3. Podíl 30 %.

Citováno v: DUŠEK, Karel, Jiří PODZEMSKÝ, Ivana BESHAIJOVÁ PELIKÁNOVÁ a Michal URBÁNEK. *Vliv mechanického namáhání pájených spojů u elektrických zařízení*. In: Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. s. 801–806. ISBN 978-80-214-4514-7.

- [2] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN and Ivan KUDLÁČEK. *Effects of operating conditions on automotive electronics*. In: Applied Electronic 2010. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. s. 379–382. ISBN 978-80-7043-865-7. Podíl 50 %.

Citováno v: JIRSA, Jan, Karel DUŠEK a Petr ČERNEK. *Risk Analysis of Reflow Technologies in Electronics Assembly*. In: 35th International Spring Seminar on Electronics Technology. Wien: Technische Universität, 2012. s. 1–4. ISBN 978-3-85465-015-7.

- [3] TUČAN, Marek and Pavel ŽÁK. *Influence of Climatic Cycles on Properties of Leadfree Solders*. In: POSTER 2010 - Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2010. s. 1–4. ISBN 978-80-01-04544-2. Podíl 25 %.

Oceněný poster.

- [4] ŽÁK, Pavel. *Reliability Risks of tin-rich alloys for Electronic Industry*. In: Poster 2009. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2009. s. 1–4. Podíl 100 %.

Oceněný poster.

[5] ŽÁK, Pavel. *Tvorba whiskerů při měkkém pájení v elektronice*. In: Cena nadace ČEZ o nejlepší vysokoškolský vědeckotechnický projekt. Praha: ČEZ, 2008. s. 1–9. Podíl 100 %.

Oceněný poster.

[6] ŽÁK, Pavel and Marek TUČAN. *190 Years with Galvanometers*. In: POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2011. s. 1–4. ISBN 978-80-01-04806-1. Podíl 50 %.

Oceněný poster.

[7] TUČAN, Marek and Pavel ŽÁK. *Power Station Vydra*. In: POSTER 2010 - Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2010. s. 1–4. ISBN 978-80-01-04544-2. Podíl 50 %.

Oceněný poster.

[8] TUČAN, Marek and Pavel ŽÁK. *Recycling of electronic parts and devices*. In: POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering. Praha: ČVUT v Praze, FEL, 2011. s. 1–4. ISBN 978-80-01-04806-1. Podíl 40 %.

Oceněný poster.

[9] ŽÁK, Pavel, Marek TUČAN and Ivan KUDLÁČEK. *Contribution to the study of lead-free technology in terms of LCA*. In: Diagnostika '11. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2011. s. 198–201. ISBN 978-80-261-0020-1. Podíl 50 %.

Oceněný poster.

[10] ŽÁK, Pavel. *Analýza životního cyklu fotovoltaických elektráren s ohledem na recyklaci funkčních prvků*. In: Cena nadace ČEZ o nejlepší vysokoškolský vědeckotechnický projekt. Praha: ČEZ, a.s., 2011. s. 1–7. Podíl 100 %.

Oceněný poster.

Summary

This thesis analyzes the current approach to the reliability of the electrical equipment and its changes induced by both the technical and the technological progress of the last fifteen years, and partly by the changes in the philosophy and the logistics of the industrial production and particularly by the effort of the permanent cost-cutting.

Introducing lead-free mounting technology to the EU by the RoHS directive was reflected in the technological movement towards lead-free electronics solders, electrically conductive adhesive as well as lead-free finishes of all parts and resulted into a serious turnover in the long-standing practice. This technological change brought the new failure mechanisms caused by the properties of used materials – the solders, the adhesives and finishes.

According to the above mentioned reasons, the impact on the applicability of the reliability prediction methods is discussed in this work. At the same time, the applicability of these prediction methods for the lead-free technology, as well as the possibility of their use increasing product reliability parameters with regard to changes in production costs, is analyzed. The applicability of the basic methods of the reliability prediction for using in with lead-free technology has been verified by the number of extensive tests in the laboratories, as well as in the operating conditions, both on the laboratory specimens exposed to the accelerated climatic tests, and on the products operating in the specific conditions. Finally, the work deals with a new and current issue of the relationship between the product reliability, the environmental parameters and their recycling possibilities.

Based on the experiments' results, the work comes to the conclusion to the conclusion that the transition to lead-free assembly technology has brought significant reduction in the reliability of the manufactured devices. This lower reliability is also influenced by the temporary inability of the correct reliability prediction concerning the devices produced by the lead-free mounting technologies. Thus these technologies can't be yet recommended for using in safety systems or systems operated in harsh environment or the high priority systems.