

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Zajištění kvality při výrobě cívek**

## ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

### ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jiří VOŘÍŠEK**  
Osobní číslo: **E18B0037K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Zajištění kvality při výrobě cívek**  
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

### Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s problematikou výroby cívek.
2. Zpracujte přehled používaných materiálů, postupů a metod výroby cívek.
3. Identifikujte důležité parametry popisující kvalitu vyráběných cívek.
4. Zmapujte možné chyby a vady vyskytující se při výrobě cívek.
5. Na základě vztahu příčina-následek vytvořte postup pro rychlou identifikace příčin vzniklých vad.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Z. Faktor, Transformátory a cívky, vlastnosti materiálů a efektivní návrh transformátorů.
2. Internetové zdroje.

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. František Steiner, Ph.D.**  
Katedra materiálů a technologií

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce pojednává o sériové výrobě cívek a zajištění jejich kvality. Především je pak zaměřena na příčiny vzniku neshodných dílů, jinak řečeno dílů v závadovém stavu, a předcházení jejich výskytu. Součástí práce jsou příklady používaných materiálů, nastíněny jsou postupy výroby různých druhů cívek a v neposlední řadě metod měření standardně používaných k zajištění jejich vlastností a kvality.

Samotná práce je pro přehlednost rozdělena do pěti částí; první se zabývá teorií, vlastnostmi a druhy cívek, druhá uvádí přehled a příklady používaných materiálů. Třetí část popisuje postup výroby cívek a způsoby jejich navíjení. Čtvrtá část je zacílena na popis měření, kterým musí každý vyrobený díl projít, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů a tím i kvality daného dílu. V poslední, páté kapitole, jsou popsány příčiny vzniku kvalitativních nedostatků během výroby a následně zmíněna i možná opatření proti jejich vzniku, což je zároveň jedním z cílů bakalářské práce.

## **Klíčová slova**

Kvalita výroby cívek, navíjení cívek, kvalitativní kontrola, One piece flow, působení lidského faktoru, kvalitativní opatření, prevence chyb, zpřípravkování výroby, zvyšování kvalitativního standardu

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with serial production of coils and ensuring their quality. Above all, it deals with the causes of non-conforming parts, in other words parts in defective condition, and the prevention of their occurrence. The work includes examples of materials used, outlines the production procedures of various types of coils and methods of measurement which are usually used to ensure their attributes and quality.

The work is divided into five parts; the first one deals with the theory, attributes and types of coils, the second one provides an overview and examples of used materials. The third part describes the process of coil production and methods of winding. The fourth part describes the measurements that each manufactured part must go through in order to achieve the required parameters and thus the quality of the part. The last, fifth chapter, describes the causes of quality deficiencies during production and then mentions possible measures against their occurrence, which is also one of the goals of the bachelor thesis.

## **Key words**

Quality of coil production, winding coils, quality control, One piece flow, human factor action, quality measures, error prevention, production preparation, raising the quality standard

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Písku dne 26.5.2021

Jiří Voříšek

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval společnosti Pikatron CZ s.r.o., ve které jsem zaměstnán jako vedoucí pracovník, za možnost nahlédnout do seznamu proběhlých reklamací, pořídit fotografie závadových dílů a též za poskytnutí dat z výsledků kontrol s možností je dál zpracovat pro účely této práce. Jmenovitě bych rád poděkoval kolegovi Milanu Mandryszovi a vedoucímu výroby Luděkovi Kvíčalovi za konzultace během vzniku této práce.

Dále bych chtěl poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu doc. Ing. Františku Steinerovi, Ph.D., za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ FUNKCE A VLASTNOSTI CÍVKY</b> .....	<b>13</b>
1.1 KONSTRUKCE CÍVEK .....	13
1.2 ZÁKLADNÍ ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI CÍVEK .....	15
1.2.1 <i>Vlastní indukčnost</i> .....	15
1.2.2 <i>Odpor vinutí R</i> .....	16
1.2.3 <i>Impedance Z</i> .....	16
1.2.4 <i>Kapacita vinutí C</i> .....	17
1.2.5 <i>Činitel jakosti Q</i> .....	17
<b>2 PŘEHLED ZÁKLADNÍCH MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH VE VÝROBĚ</b> .....	<b>18</b>
2.1 VODIČE .....	18
2.2 CÍVKOVÉ TĚLESO – KOSTRA .....	18
2.3 KRABÍČKY .....	19
2.4 JÁDRA .....	20
2.5 PŘÍSLUŠENSTVÍ KE KOSTRÁM A JÁDRŮM .....	21
2.6 PÁJKY A TAVIDLA .....	21
2.6.1 <i>Olovnatá pájka</i> .....	21
2.6.2 <i>Bezolvnatá pájka</i> .....	21
2.6.3 <i>Tavidla</i> .....	22
2.7 IZOLAČNÍ MATERIÁLY .....	22
2.8 POUZDŘENÍ A IMPREGNACE CÍVEK .....	23
2.8.1 <i>Zalévací pryskyřice</i> .....	23
2.8.2 <i>Impregnační laky</i> .....	23
2.9 LEPIDLA .....	24
<b>3 METODIKA, POSTUPY VÝROBY</b> .....	<b>25</b>
3.1 PŘEJÍMKA MATERIÁLU .....	25
3.2 SKLADOVÁNÍ A NAKLÁDÁNÍ S MATERIÁLEM .....	26
3.3 KVALIFIKACE PERSONÁLU .....	27
3.4 ZPŮSOBY NAVÍJENÍ .....	28
3.4.1 <i>Strojní navíjení lineárních cívek</i> .....	28
3.4.2 <i>Strojní navíjení toroidních cívek</i> .....	31
3.4.3 <i>Ruční navíjení</i> .....	33
3.5 UVOLNĚNÍ PRVNÍHO KUSU A VÝROBA .....	34
3.6 PRŮBĚH VÝROBY OPERÁTOREM A JEHO KONTROLA .....	35
3.6.1 <i>One piece flow</i> .....	35
3.6.2 <i>Návin a cínování</i> .....	35
3.6.3 <i>Osazení jádry</i> .....	35
3.6.4 <i>Impregnace a zapouzďení</i> .....	36
3.6.5 <i>Kusová zkouška a další kontroly</i> .....	37
<b>4 ZPŮSOBY MĚŘENÍ</b> .....	<b>38</b>
4.1 ELEKTRICKÉ VLASTNOSTI .....	38
4.2 MECHANICKÉ VLASTNOSTI .....	39
<b>5 VÝROBNÍ VADY, JEJICH PŘÍČINY A OPATŘENÍ</b> .....	<b>41</b>
5.1 MULTIPLIKATIVNÍ SYSTÉMOVÉ CHYBY .....	41
5.2 NAHODILÉ CHYBY .....	41
5.2.1 <i>Chyba operátora – lidský faktor</i> .....	42
5.2.2 <i>Nevyhovující mechanické parametry</i> .....	47



---

5.2.3	<i>Nepředepsané elektrické rozměry</i> .....	54
5.3	BALENÍ.....	61
5.4	TABULKA RYCHLÝCH ŘEŠENÍ.....	62
5.5	DOPORUČENÁ OPATŘENÍ PROTI VZNIKU VÝROBNÍCH VAD.....	65
<b>ZÁVĚR</b> .....		<b>67</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....		<b>70</b>

## Úvod

Aby bylo možno pojednávat o zajištění kvality při sériové výrobě cívek, je zapotřebí nejprve definovat pojem kvalita. Kvalita je parametr vyjadřující objektivní soulad vlastností výrobku s požadavky zákazníka, norem nebo standardů. Rozlišují se tři základní kvalitativní stavy výrobku. Ideálním stavem je „stav cílový“, který se blíží dokonalosti a jehož se výrobce snaží docílit, což však bohužel není vždy možné. Ve většině případů se tedy pracuje s díly, které příhodně vystihuje „stav přijatelný“. Takový díl je sice odchýlen od stavu cílového, nicméně na jeho funkční vlastnosti a spolehlivost nemá odchylka takový vliv, aby byla omezena jeho bezproblémová funkce. Posledním stavem je „stav závadový“, kde jsou odchylky již příliš velké od stavu cílového, vyskytují se odchylky zamezující spolehlivé dlouhodobé funkci nebo jsou výrobky v rozporu se zákaznickými požadavky.

Z toho, mimo jiné, vyplývá důležitost kvality pro konkurenční boj dodavatelských firem na trhu. Ze zákaznického hlediska je tedy důležité vybírat jako dodavatele certifikované firmy, u kterých je menší pravděpodobnost dodání dílů v závadovém stavu, které by znamenalo následné stahování navazujících produktů z trhu. K tomu slouží kupříkladu certifikace dle normy ISO 9001. Firma získáním příslušné certifikace prokazuje, že je schopna dlouhodobě naplňovat kvalitativní očekávání koncových odběratelů výrobků.

Dalším důležitým předpokladem pro porozumění předložené práci, která bude využita též jako podklad pro školení zaměstnanců firmy Pikatron CZ s. r. o., a tím i následné udržení kvalitativního standardu ve výrobě, je seznámení se s tím, co je to cívka, jaké jsou jejich druhy a jaké vlastnosti se od nich požadují. Důležité je též specifikovat, jaké existují způsoby, kterými lze tyto vlastnosti ovlivnit v procesu výroby a zda je možno všechny uvedené požadavky splnit v souvislosti s technologickými omezeními. Nežádá se totiž výrobce při zavádění nových produktů dostane do situace, kdy není možno danou cívku vyrobit z důvodu nevhodného strojního vybavení dílny, nedostatku vhodných přípravků, nedostatečně proškolenému personálu a podobně.

Cílem předložené bakalářské práce je tato omezení, jež přinášejí výrobní možnosti, lokalizovat přímo ve výrobním procesu. Následně je zapotřebí je definovat a popsat jejich příčiny a poté na základě těchto poznatků odvodit, jakých kvalitativních výsledků je možno

dosáhnout v sériové produkci daného výrobku a jakým způsobem jej lze zvýšit. Cílem této bakalářské práce je však především ucelení informací potřebných pro zjednodušení hledání příčin vzniku kvalitativních nedostatků a tím částečně napomout prevenci výroby dílů v závadovém stavu, kterým se dříve říkalo lidově „zmetky“. Ty v každé výrobě znamenají promrhaný čas, materiál a tím i finanční prostředky.

## Seznam symbolů a zkratk

$L$ .....	Vlastní indukčnost [ $H$ ]
$R$ .....	Odpor [ $\Omega$ ]
$C$ .....	Kapacita [ $F$ ]
$Q$ .....	Činitel jakosti
$N$ .....	Počet závitů
$S$ .....	Průřez [ $m^2$ ]
$l$ .....	Délka [ $m$ ]
$X$ .....	Reaktance [ $\Omega$ ]
$X_L$ .....	Induktivní reaktance [ $\Omega$ ]
$Z$ .....	Impedance [ $\Omega$ ]
$\omega$ .....	Úhlová rychlost [ $rad.s^{-1}$ ]
$R_m$ .....	Magnetický odpor [ $H^{-1}$ ]
$G_m$ .....	Magnetická vodivost [ $H$ ]
$\rho$ .....	Měrný elektrický odpor – rezistivita [ $\Omega*m$ ]
$\alpha$ .....	Teplotní součinitel elektrického odporu [ $K^{-1}$ ]
$\mu$ .....	Permeabilita
PI.....	Polyimid
PA.....	Polyamid
PS.....	Polystyren
PBT.....	Polybutylentereftalát
PET.....	Polyetylentereftalát
PPS.....	Polyfenylsulfid
THT.....	Through hole technology (technologie osazování plošných spojů součástkami s drátovými vývody)
SMT.....	Surface mount technology (povrchová montáž; technologie osazování plošných spojů součástkami na povrch plošného spoje)
SMD.....	Surface mount device (součástka určená pro povrchovou montáž)
$A_L$ .....	Cívková konstanta [ $nH/N^2$ ]
AQL.....	Acceptance Quality Limit (limit přijetí kvality)
UV.....	Ultrafialové světlo

# 1 Základní funkce a vlastnosti cívky

Cívka je jedním ze základních elektrotechnických pasivních prvků. Na rozdíl od induktoru, ideální cívky, která se vyznačuje pouze indukčností  $L$ , se u reálné cívky vyskytují i další parametry, například odpor vinutí  $R$  nebo kapacita mezi jednotlivými vinutími  $C$  [1][3]. Všechny tyto parametry jsou silně geometricky závislé. Za geometrickou vlastnost se dá považovat počet závitů  $N$ , délka cívky, její průřez a podobně [4].

Ve stejnosměrných obvodech se cívka vyznačuje pouze elektrickým odporem vinutí a stálým magnetickým polem ve svém okolí. K jejímu praktickému využití tedy dochází převážně ve střídavých obvodech [1].

V obvodě, kterým protéká časově proměnný proud, jenž může být jak nízkofrekvenční, tak vysokofrekvenční, vzniká kolem cívky proměnné magnetické pole. Následkem působení takového magnetického pole se v cívce indukuje elektromotorické napětí. Z Lenzova zákona je zřejmé, že indukované napětí působí vždy proti změnám, které jej vyvolaly. Tím vzniká na cívce reaktance  $X_L$ , kterou je možno nazývat též induktance. Induktanci lze interpretovat i jako jalový odpor proti průchodu střídavého proudu. Induktance a z ní vycházející impedance  $Z$  je veličinou přímo úměrně závislou na vlastní indukčnosti  $L$  a frekvenci dle vztahů (1) a (2).

$$X_L = \omega L \quad (1)$$

$$Z = jX_L = j\omega L \quad (2)$$

Na cívce zároveň vzniká fázový posun o čtvrt periody; tj. o  $\pi/2$  radián, kde střídavé napětí předchází střídavý proud [4].

## 1.1 Konstrukce cívek

Základním konstrukčním prvkem cívky je izolovaný vodič stočený do tvaru šroubovice. V drtivé většině případů je vodič měděný. Nejzákladnější provedení vinutí cívky je tvořeno dostatečně tuhým drátem, díky kterému je tato konstrukce samonosná, v jedné vrstvě s rovnoměrným rozložením a hustotou závitů. Z toho plyne předpoklad, že lze magnetické pole uvnitř takové cívky považovat za rovnoměrné. Délka cívky  $l$  často přesahuje její

průměr. Taková cívka připomíná svým vzhledem pružinu. Označována je jako lineární vzduchová cívka – solenoid [5].

Kromě samonosné konstrukce se však vodič mnohem častěji navíjí na cívkové těleso, tzv. kostru, z nemagnetického materiálu, jenž zajišťuje cívce oporu. Toto uspořádání je vhodné zejména při použití vodiče s menším průřezem, který není dostatečně tuhý. Takové vinutí je často rozloženo do několika vrstev, aby se na kostru vešel požadovaný počet závitů. Pokud není v dutině cívky vložen žádný feromagnetický materiál, jedná se o cívku vzduchovou. Taková cívka má neuzavřený magnetický obvod a v důsledku toho velmi malou vlastní indukčnost  $L$ .

Magnetické vlastnosti cívky lze výrazně vylepšit vsunutím jádra z feromagnetického materiálu, přes které se magnetické pole uzavře. Nejčastěji z magneticky měkkých křemíkových ocelí, případně feritu. K omezení vířivých proudů se při použití ocelového jádra používá vrstvení jednotlivých plechů oddělených od sebe izolačním materiálem. (povrchovými oxidy nebo lakem). Feritové jádro je tvořeno slisovanými oxidy železa a uhličitany kovů jako je mangan, zinek, nikl nebo hořčík. Konečných mechanických vlastností je dosaženo sintrováním, tj. výpalem, podobně jako je tomu u keramiky [6].

Jádra se vyrábějí v mnoha tvarových provedeních. Je žádoucí, aby jádro přesně pasovalo do kostry, ale především lze tvarem jádra ovlivnit výsledné magnetické vlastnosti. Jedním z mnoha příkladů důležitosti tvaru jádra může být využití vzduchové mezery v magnetickém obvodu. Výhodou využití vzduchové mezery je linearizace vlivu permeability, která se působením teploty, vlivem stárnutí a přemagnetování mění. V souvislosti s tím se mění i vlastní indukčnost. Nevýhodou však je, že vlivem rozptylových magnetických toků může cívka ovlivňovat okolní obvody. S rostoucí vzduchovou mezerou roste i pravděpodobnost tohoto druhu rušení [11].

Dalším důležitým tvarem jader je prstenec – toroid. Nejčastěji bývá prstenec uzavřený a kruhového tvaru. Po navinutí vodiče na takovéto jádro, které složí jako opora vinutí, vzniká toroidní cívka. Toroidní uspořádání cívky má velkou výhodu v tom, že veškeré magnetické pole se uzavírá uvnitř kruhového jádra a velice málo ovlivňuje své okolí. Zároveň se toroidní cívky vyznačují nízkými magnetickými ztrátami, nižší hmotností a hlučností při provozu v transformátoru než při použití ocelových skládaných jader. Uzavřený kruhový tvar jádra

je nejčastější, ale není jediným vyráběným tvarem. K dispozici jsou i jádra oválného či elipsovitého tvaru, ty ale vyžadují uzpůsobení navíjecích strojů pomocí vhodného příslušenství [7]. K výrobě toroidních jader se využívá ferit nebo orientovaný ocelový plech stočený do svitku. Takovéto jádro může být zapouzdřeno izolačním lakem, případně vloženo do plastového obalu. U toroidního jádra lze vytvořit jednu či více vzduchových mezer [7].

Při vytvoření více samostatných vinutí na stejný magnetický obvod lze cívku považovat za transformátor. V případě jednoho vinutí s odbočkami za autotransformátor. Transformátor je netočivý elektrický stroj, který slouží k přenosu elektrické energie mezi dvěma galvanicky oddělenými obvody, často o velmi rozdílných napěťových hladinách. Vlastnosti transformátoru, jako je například jeho převod, určují právě parametry cívek v něm obsažených, především počet závitů  $N$  a průřez vodičů.

Cívky lze však v omezené míře vytvářet například i na deskách plošných spojů či fóliích [8]. Jedná se v takovém případě vždy o rovinnou vzduchovou cívku o velmi malé indukčnosti. Takové cívky nalézají využití kupříkladu v bezdrátových nabíječkách mobilních telefonů, jako anténa bezkontaktní platební karty nebo jako anténa pasivního RFID čipu pokladních a evidenčních systémů [9].

## 1.2 Základní elektrické vlastnosti cívek

### 1.2.1 Vlastní indukčnost

Vlastní indukčnost  $L$  je u cívek hlavní charakteristickou vlastností. Popisuje schopnost vodiče protékaného elektrickým proudem vytvářet ve svém okolí magnetické pole [4].

Vlastní indukčnost je velice silně závislá na geometrickém uspořádání cívky a na materiálových vlastnostech prostředí, ve kterém se má magnetické pole vytvořit. Ze statické definice vlastní indukčnosti lze vyjádřit vztah (3).

$$L = N^2 G_m = \frac{N^2}{R_m} = N^2 \mu_0 \mu_r \frac{S}{l} \quad (3)$$

Ze vztahu (3) je zřejmé, že vlastní indukčnost je přímo úměrně závislá na druhé mocnině počtu závitů  $N$  a magnetické vodivosti  $G_m$  [4]. Převrácenou hodnotu, magnetický odpor  $R_m$ ,

lze vztáhnout k permeabilitě prostředí, ve kterém se pole vytvoří. Za předpokladu použití vzduchové cívky by ve *vztahu (3)* figurovala pouze permeabilita vakua  $\mu_0$ . K velice výraznému zvětšení indukčnosti dochází, pokud se magnetické pole uzavírá v jádře z feromagnetického materiálu. Takové jádro lze považovat za magnetický obvod s permeabilitou  $\mu_r$  [6][11].

### 1.2.2 Odpor vinutí $R$

Další ze základních vlastností, kterou cívky vykazují, je odpor vinutí. Pod tímto pojmem si lze představit stejnosměrný elektrický odpor vodiče  $R$ , ze kterého je cívka navinuta. Jeho velikost je závislá na příčném průřezu, délce a rezistivitě vodiče [4].

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (4)$$

Odpor je teplotně závislou veličinou, proto je třeba jej měřit za konstantních teplotních podmínek. Pro měděné vodiče platí, že mají kladný teplotní součinitel elektrického odporu. To znamená, že s rostoucí teplotou roste zároveň i velikost odporu.

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta t) \quad (5)$$

Z důvodu opakovatelnosti výsledků měření je důležité měřit vždy za stejných měřících podmínek. Při měření stejného dílu za rozdílných teplot je možno dosáhnout diametrálně rozdílných hodnot stejnosměrného odporu  $R$ . Například dle interních zvyklostí rodiny firem Pikatron jsou udávány hodnoty elektrického odporu  $R$  při 20 °C, není-li v pracovním postupu uvedeno jinak [12].

### 1.2.3 Impedance $Z$

Střídavou obdobou stejnosměrného odporu je impedance  $Z$ , která popisuje zdánlivý odpor průchodu střídavého proudu. Vyjádřena je komplexním číslem, kde reálnou složku představuje stejnosměrný odpor  $R$  a imaginární složku reaktance  $X$ . Absolutní hodnotu impedance je možno získat pomocí Pythagorovy věty podle *vztahu (6)*.

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (6)$$



Na rozdíl od stejnosměrného odporu může být napětí vůči proudu na impedanci fázově posunuto. Tento fázový posuv vzniká právě díky vlivu reaktance na průchod střídavého proudu [4].

#### 1.2.4 Kapacita vinutí C

Kapacita  $C$  je veličinou vyjadřující schopnost cívky uchovávat elektrický náboj. U cívek je považována za parazitní a snahou je ji zmenšovat. Toho lze dosáhnout využitím vhodnějších izolačních materiálů vodičů nebo snižováním napěťového rozdílu mezi vrstvami vinutí. Jelikož je kapacita také závislá na geometrickém rozložení, využívá se různých metod rozkládání závitů při návinu. Například rozdělováním vinutí do komor, prokládání vrstev polystyrénovou fólií apod. [1].

Kupříkladu u vysokofrekvenčních cívek se kvůli snižování kapacity mezi jádrem a vinutím vzdaluje vinutí od jádra prvotním návinem několika závitů polystyrenové folie na kostru cívky. Zároveň se však kostra nenavíjí úplně naplno, aby se zachovala vzdálenost od jádra i z této strany [1].

Impregnací cívek se bohužel kapacita zvyšuje, totéž platí i při spojení jednoho vývodu vinutí s jádrem [1].

#### 1.2.5 Činitel jakosti Q

Jelikož reálné cívky vykazují kromě indukčnosti  $L$  také parazitní vlastnosti je využíván takzvaný činitel jakosti  $Q$ . Bude-li skutečná cívka v rezonančním obvodu nahrazena sériovou kombinací induktoru a rezistoru zastupující ztrátový odpor, lze činitel jakosti chápat jako poměr, kolikrát je napětí na induktoru větší než na rezistoru při rezonančním kmitočtu. Z uvedeného tedy vyplývá, že čím je větší činitel jakosti, tím nižší nastávají energetické ztráty a tlumení kmitů [10]. Činitel jakosti cívky je definován vztahem (7).

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (7)$$

## 2 Přehled základních materiálů používaných ve výrobě

### 2.1 Vodiče

Při výrobě vinutí induktivních prvků se nejčastěji používají měděné vodiče. Zejména v provedení jednožilového izolovaného vodiče. Tyto vodiče se vyrábějí s jednoduchou polyuretanovou izolací nebo s izolací zesílenou. Hlavním rozdílem mezi izolacemi je jejich elektrická pevnost, pevnost proti oděru a teplotní třída.

Zvolení správného druhu izolace hraje klíčovou roli jak pro samotný výrobní proces, tak pro následnou kvalitu a vlastnosti vinutí. Důležitým aspektem správně zvolené izolace je z hlediska výroby pájitelnost takového vodiče. Pro vinutí, jehož vývody je zapotřebí snadno pájet bez předchozího mechanického odstraňování lakové vrstvy izolace, se používají samopájitelné polyuretanové laky. Samopájitelné laky náleží do teplotní třídy B, tj. do 130°C. U vodičů se zesílenou izolací závisí teplotní třída na druhu izolace, počtu vrstev laku nebo materiálu opředení. V závislosti na provedení takové izolace lze dosahovat teplotních tříd F (155 °C), H (180 °C) i teplotní třídy 200 (200 °C) [1][2][14][15]. U vinutí, kde je vyžadována větší mezizávitová elektrická pevnost, je využíváno vodičů se zesílenou izolací. Tyto vodiče se využívají rovněž tam, kde se vodič během návinnu mechanicky odírá, typicky u toroidních navíječek.

Dalším druhem vodičů používaných k výrobě vinutí jsou vysokofrekvenční lankové vodiče. Ty se vyrábějí z lankových vodičů, které jsou též nazývány žilami, stočených do svazku s předem definovaným zkrutem a následným opředěním syntetickým polyamidovým hedvábím. Takové uspořádání vodiče se volí z důvodu omezení elektrického povrchového jevu (skin efektu). Jeho působením se s rostoucím kmitočtem, vlivem vytlačování elektrického proudu k povrchu vodiče, snižuje pracovní průřez a zvětšuje jeho odpor. Jak již název napovídá, jsou používány pro vinutí, která jsou určena pro obvody s větším pracovním kmitočtem [1][2].

### 2.2 Cívkové těleso – kostra

Při použití jiné, než samonosné konstrukce je třeba vinutí cívky vyhotovit na vhodnou oporu. U lineárních cívek k tomuto účelu slouží cívkové těleso, takzvaná kostra. Lze ji popsat jako trubku čtyřhranného či kruhového průřezu s čely, ve kterých bývají drážky

určené pro vyvedení vodiče vinutí. V čelech mohou být vedle vyváděcích drážek připraveny vodivé špičky z pocínované mosazi nebo bronzu, takzvané piny. Ty slouží jako propojovací terminály pro konce vinutí, umožňující budoucí vodivé spojení se zbytkem obvodu. Takovéto kostry mívají piny již zalité v plastu. Některé druhy koster však disponují pouze předpřipravenými otvory pro následné vložení pinu. V takovém případě se osazení pinů provádí až těsně před samotným navíjením [16]. Samotné piny mohou mít různé tvary, které jsou závislé na způsobu budoucí montáže cívky na desku plošného spoje. U větších koster se jedná převážně o technologii THT, kde se piny prostrkávají skrz desku plošného spoje. Pokud je cívka vyráběná jako SMD komponenta určená pro technologii SMT, má vývody uzpůsobené tak, aby dosedaly na pájecí plošky na povrchu desky. Častým provedením je tvar takzvaného „racčího křídla“ nebo tvar písmene J.

Dle konstrukce navíjecí komory lze kostry rozdělit na jednokomorové a vícekomorové. Vícekomorová kostra je vhodná například pro transformátory, kde je potřeba zajistit dostatečnou izolaci mezi primárním a sekundárním vinutím [1][16].

Dříve se kostry vyráběly například z pertinaxu, v dnešní době je však využíváno spíše technologie tlakového vstřikování plastů. K výrobě koster se používá polyamid (PA), polybutylentereftalát (PBT), polyetylentereftalát (PET) nebo polyfenylsulfid (PPS). Materiál se volí s ohledem na tepelnou odolnost při pouzdření nebo teplotní třídu. Dalšími požadavky na materiál kostry jsou odolnost vůči plazivým proudům a nehořlavost [1][16].

## 2.3 Krabičky

Krabičky lze rozdělit z hlediska konstrukce a následného použití na dva typy. Tím prvním a konstrukčně jednodušším jsou krabičky přizpůsobené pro kostry osazené jádry. Tyto krabičky jsou dodávány k většině běžně dostupných koster. Do takovéto krabičky se umísťují již navinuté a osazené cívky především z důvodu následného zapouzdření zalévací pryskyřicí [16].

Druhý typ krabiček je využíván pro osazení toroidních cívek. Takováto krabička má v sobě většinou již osazené piny pro připojení konců vinutí. Pokud piny nejsou osazené, jsou pro ně připraveny patřičné prostory a osazují se až těsně před zástavbou cívky. Materiály určené k výrobě krabiček jsou shodné s materiály používanými k výrobě koster.

## 2.4 Jádra

Jádro tvoří spolu s vinutím nejdůležitější část cívky, proto je na něj při výrobě kladen velký důraz. Jádra jsou vyráběna nejčastěji z transformátorových plechů z křemíkové oceli nebo z feritového materiálu. V obou případech jsou vyráběna v nejrůznějších tvarových provedeních.

Pro vysokofrekvenční cívky je vhodnější používat jádra z magneticky měkkých feritů. Příkladem jader pro lineární cívky mohou být například takzvaná hrníčková jádra, jádra tvaru písmene E apod. Vyráběných tvarů je však mnohem více a dalo by se říct, že přesně kopírují tvarovou nabídku koster, pro které jsou určena [6]. Feritový materiál je však poměrně křehký a lze jej mechanickými vlastnostmi přirovnat ke keramice. Z toho důvodu je třeba při osazování těchto jader dbát zvýšené opatrnosti, aby se předešlo případnému poškození. Jelikož jsou jádra při výrobě vypalována podobně jako keramika, dochází během tohoto procesu k tvarovým deformacím. Následně se proto musí styčné plochy párových feritů zbrousit, aby na sebe oba díly přesně dolehly s co nejmenší vzduchovou mezerou. Vytvoření definované vzduchové mezery se provádí zbroušením středového sloupku jádra o předem přesně určenou délku [6].

Jako jádra pro cívky pracující na nižších kmitočtech jsou vhodnější transformátorové plechy. Z rozměrových důvodů je mnohem vhodnější používat výseky z neorientované oceli. Výseky jsou dodávány ve velikostech uzpůsobených nabízeným kostrám. Standardní tloušťka plechu je 0,35 mm a 0,5 mm. Do koster se osazují buďto jednotlivě, nebo jako předem připravený svazek.

Při výrobě toroidních jader je taktéž možno používat oba materiály. Při výrobě toroidního jádra z plechu je však mnohem výhodnější využívat ocel orientovanou. Následně se takový plechový svitek dále tvarově opracovává. Vyřezávají se do něj vzduchové mezery, srážejí se hrany, lakuje se do komaxitu, případně se vkládá do plastových pouzder [7]. I při výrobě toroidního jádra z feritového materiálu je možné dosahovat velké škály průměrů. Feritová toroidní jádra je taktéž výhodné opatřit lakovým povlakem. Jednak z důvodu izolace, ale především z důvodu zpevnění a rozložení tlaku, který je na jádro vyvíjen během navíjení vodiče [6].

## 2.5 Příslušenství ke kostrám a jádrům

Ke kostrám je mimo krabiček dodáváno i další příslušenství. Nejčastěji se jedná o třmeny z nerezové pružinové oceli. Pomocí nich se vzájemně fixují obě poloviny jádra. Taktéž mohou fixovat jádra vůči kostře [17]. Tvar třmenů je uzpůsoben k tomu, aby po osazení vyvíjely neustálý tlak, tlačící jádra k sobě. Příkladem může být kostra typu ETD 29 [18].

Příslušenství se dodává nejen ke kostrám, ale i k samotným jádrům. Kupříkladu k hrníčkovým jádrům jsou běžně dodávány izolační podložky mezi jádro a kostru nebo třmeny [17]. Takovéto třmeny bývají vybaveny koncovkou, která slouží jako zemnicí pin.

Ani v případě příslušenství k toroidním jádrům se nemusí jednat pouze o krabičky. Na trhu jsou běžně dostupné základnové desky, do kterých se již navinuté toroidní jádro vlepí. Tyto desky slouží jako stojan, ale především jsou na nich předinstalovány piny usnadňující budoucí osazení cívky do desky plošného spoje [17].

## 2.6 Pájky a tavidla

Pro proces pájení, během kterého jsou spojovány konce vinutí s piny, jsou nesmírně důležité používané pájky. Ty se rozdělují na dvě základní skupiny – olovnaté a bezolovnaté. Dále se rozdělují podle obsahu jednotlivých příměsí kovů [28].

### 2.6.1 Olovnatá pájka

V dnešní elektrotechnické výrobě se s olovnatá pájka již téměř nevyskytuje, neboť se přešlo na bezolovnaté pájecí systémy. Výjimkou jsou však produkty určené pro segment vojenství, zdravotnictví, trakci a letectví [12].

### 2.6.2 Bezolovnatá pájka

Z ekologických důvodů se začaly ve velké míře používat bezolovnaté pájky. Mají však, v porovnání s olovenými pájkami, horší vlastnosti. Nejzásadnější je nižší mechanická pevnost a častější vznik intermetalických sloučenin. Z hlediska zpracování je důležitým faktorem i jejich horší vzlínavost a potřeba vyšších pájecích teplot. Ty jsou mnohdy tak

vysoké, že poškozují materiál koster. Pro zmírnění těchto nepříznivých vlastností je nasnadě používat vhodná tavidla.

### 2.6.3 Tavidla

Ke zlepšení pájecích procesů se na pájené povrchy přidávají tavidla. Jedná se o chemické látky, které mají za úkol odstranit povrchové oxidy z pájených povrchů a napomoci tak lepší smáčivosti pájky. Díky odstranění povrchových oxidů je pak možné snižovat teplotu pájení. Je spousta různých druhů tavidel na různých bázích, která jsou různě aktivní a následně účinná.

Existují středně a silně aktivní tavidla, která se vždy smývají, ale i tzv. nízkoaktivní bezoplachová tavidla [29]. Zažitou praxí je nicméně snaha o odstraňování zbytků tavidel, neboť mohou z dlouhodobého hlediska působit na pájený spoj silně korozivně.

## 2.7 Izolační materiály

Během navíjení cívek je využíváno i mnoho druhů izolačních pásek a fólií. Jsou používány jako základová izolace, prokladová izolace nebo jako povrchová bandáž. Příkladem může být použití polystyrenové fólie (PS) jako základové izolace pro zvětšení vzdálenosti mezi vinutím a jádrem u vysokofrekvenčních cívek [1]. Dalším často využívaným materiálem pro základové a prokladové izolace je fólie Hostaphan<sup>®</sup> na bázi polyethylentereftalátu (PET).

K materiálům využívaným ke zhotovení prokladové – mezivrstevové – izolace patří krom výše zmíněných fólií i materiál Nomex<sup>®</sup>. Ten je vhodný pro svou silnou odolnost vůči vysokým teplotám a chemikáliím [19], případně řada lepicích pásek. Za zmínku stojí hojně využívané lepicí polyesterové (PE) izolační pásy od firem 3M nebo Tesa. Je-li třeba zajistit větší tepelnou a elektrickou odolnost, je možné využít polyimidovou (PI) pásku Kapton<sup>®</sup>. Lineární cívky se často opatřují i povrchovou bandáží z takovýchto lepicích pásek.

V případě izolace toroidních cívek se hovoří především o základové a závěrečné bandáži. Naprostou nutností u surových ocelových jader bez lakové vrstvy a sražených hran je základová bandáž. V případě vynechání či nesprávného provedení je téměř jisté, že dojde k porušení izolace vodičů první vrstvy vinutí o poměrně ostrou hranu jádra. Povrchová

bandáž bývá v případě toroidních cívek provedena až u větších a konstrukčně složitějších výrobků.

Kromě izolací přímo ve vinutí se ve výrobě cívek velice často využívají různé izolační hadičky a trubice. Jejich primárním využitím je doplňková izolace vodičů. Jsou ale i velice vhodnou mechanickou ochranou či značícím prvkem díky široké škále barev. Příkladem mohou být různobarevné silikonové hadičky či notoricky známé teplem smrštitelné trubice.

## **2.8 Pouzdření a impregnace cívek**

### **2.8.1 Zalévací pryskyřice**

Cívky vkládané do krabiček jsou následně zalévány vhodnou izolační pryskyřicí. Těch je velmi široká škála od celé řady výrobců. U většiny však platí, že se jedná o dvousložkové pryskyřice. Ty je nutno před aplikací velice důkladně připravovat. Může se jednat o procesy homogenizace, temperování, sušení apod. Z takových zalévacích hmot lze jmenovat např. Araldite® CW 2243 L, WEVO-Casting Resin PU 390, Herberts® E 8702 FW a další. Všechny výše zmiňované výrobky jsou příkladem dvousložkových polyuretanových pryskyřic. Velice důležité je důkladné promíchání před zpracováním, neboť plnivo v nich obsažené má při delším skladování tendence sedat ke dnu skladovací nádoby [12][20][21][22].

### **2.8.2 Impregnační laky**

Část produkce cívek je běžně lakována impregnačními jednosložkovými pryskyřicemi. Tyto pryskyřice čili laky jsou ve většině případů tvrditelné za zvýšené teploty. Příkladem je pryskyřice Herberts® Resin E 8571 Voltatex 4001. Za pokojové teploty nedochází u tohoto laku k vytvrzení. Vytvrzení nastává až při teplotách převyšujících 100 °C. K plnému vytvrzení dojde přibližně za 8 hodin při teplotě 110 °C. Rychlost vytvrzení lze urychlit zvýšením vytvrzovací teploty [23].

Výše uvedené však není vždy pravidlem. Příkladem je lak Elmotherm® FS 190, který za pokojové teploty plně vytvrdí během 24 hodin. Tento čas lze navíc zvýšením teploty zkrátit až na pouhé dvě hodiny [24].

## 2.9 Lepidla

Během výroby jsou jednotlivé součásti cívek k sobě taktéž fixovány lepidly. Jedná se běžně o párové ferity, nejrůznější úchyty nebo izolační podložky. Lepidel je opět velmi široká škála a každé využití vyžaduje od používaného lepidla poměrně rozdílné vlastnosti. Mezi lepidla určená k lepení feritů patří kupříkladu metakrylátové konstrukční lepidlo LOCTITE® AA 326, které je možné doplnit aktivátorem LOCTITE® SF 7649 [25]. Na trhu jsou však metakrylátová lepidla k dostání i od jiných výrobců, například lepidla řady ML od firmy DELO.

Mezi lepidla vhodnější k lepení konstrukčních prvků, jako jsou úchyty, šrouby a podobně, patří dvousložková polyuretanová (PU) a epoxidová lepidla. Příkladem, který je možné uvést, je epoxidové lepidlo UHU PLUS endfest 300, případně obdobné lepidlo s výrazně kratší dobou zpracovatelnosti UHU PLUS 5 min schnellfest. Tato lepidla mají v porovnání s předchozími druhy lepidel mnohem vyšší viskozitu [26][27]. Vytvrzování lepidla UHU PLUS endfest je možné urychlit zvýšením teploty. Při zahřátí se před vytvrzením jeho viskozita snižuje, což často komplikuje samotnou výrobu a je proto lepší nechat jej vytvrzovat za pokojové teploty [12].

V případě potřeby rychlého vytvrzení lepeného spoje se často volí kyanoakrylátová vteřinová lepidla, namátkou lepidla Sicomet® 85 nebo LOCTITE® 406. Většinou však bývají tato lepidla určená k lepení méně namáhaných spojů, nebo pouze k prvotnímu přichycení, kdy je následně lepený spoj fixován ještě jiným způsobem.



## 3 Metodika, postupy výroby

### 3.1 Přejímka materiálu

Jedním ze základních předpokladů pro výrobu jakéhokoliv kvalitního produktu je, kromě správně nastavených výrobních procesů, kvalifikovaného personálu a správného technického návrhu, především zajištění požadované kvality vstupních materiálů. V dnešní době je možno pořídit na první pohled takřka totožný materiál od několika různých dodavatelů v různých kvalitativních stupních. Proto je nesmírně důležité při dodávkách provádět vstupní kontrolu dodaného materiálu.

Vstupní kontrola však nespočívá v pouhé kontrole správného typu a dodaného množství materiálu, ale především v kontrole jeho deklarovaných vlastností. Kontrolované vlastnosti se odvíjejí od povahy zkoumaného materiálu. Například u dodávky zalévacích pryskyřic je možno testovat viskozitu, obsaženou vlhkost a podobně. U toroidních jader se standardně kontrolují mechanické parametry a kvalita provedení povrchové úpravy. U feritových jader pro lineární cívky je sledován jejich tvar, velikost výbrusu vzduchové mezery středového sloupku apod. U obou výše zmiňovaných druhů jader je vhodné především změřit cívkovou konstantu  $A_L$  a porovnat ji s deklarovanou hodnotou [30]. Cívková konstanta udává velikost vlastní indukčnosti  $L$  při určitém počtu závitů dle *vztahu (8)*.

$$A_L = \frac{L}{N^2} \quad (8)$$

Velmi často se však, z důvodu úspor finančních i časových, dodaný materiál netestuje vůbec. V lepším případě se tak děje alespoň při změně šarže dodávaného materiálu. To je však z hlediska zpracovatele obrovský risk, který se nemusí vyplatit. Při dodání závadového materiálu je třídění, vyřazování již zpracované části materiálu a případná reklamace finančně i časově mnohem nákladnější, než pravidelná a důkladná vstupní kontrola. O přijetí nebo odmítnutí dodávky je možno rozhodnout například metodou AQL [31]. V ideálním případě je vhodné kontrolovat každou dodávku materiálu. Jedině tím lze eliminovat příjem takového materiálu, který byl například mechanicky poškozen přepravou, viz *obrázek 1*. Na něm jsou zachycena feritová ETD jádra s poškozenými styčnými plochami, což je nepřijatelné dle normy IPC-A-610E-CZ [40].



Obr. 1 Feritová jádra ETD34-PL7 Ls 2,2mm poškozena přepravou

### 3.2 Skladování a nakládání s materiálem

Každý materiál se po úspěšném provedení vstupní kontroly přijímá na sklad a je uskladněn pro něj vhodným způsobem. Jak lze předpokládat, jedním z nejkritičtějších materiálů z hlediska uskladnění jsou veškeré chemikálie. Jejich uskladnění podléhá zvláštním předpisům a opatřením z hlediska životního prostředí, požární ochrany apod. Pro jejich kvalitu a zpracovávání je však mnohem důležitější vliv skladovacích podmínek na uskladněný materiál.

Chemikálie, jako jsou například zalévací pryskyřice, tavidla, oplachy a lepidla, mají předepsanou skladovací teplotu i vzdušnou vlhkost. Při nedodržení těchto podmínek materiál rychleji stárne, mění se jeho vlastnosti a může být i zcela znehodnocen. Z tohoto důvodu je vhodné sklad vybavit klimatizací či stavebně oddělit skladovací prostory takto citlivých materiálů a klimatizovat pouze tyto prostory. Například ve firmě Pikatron CZ s.r.o. je tento klimatizovaný sklad chemikálií udržován na konstantní teplotě v rozmezí 16-24 °C.

Materiály jako například kyanoakrylátová lepidla vyžadují ještě nižší skladovací teplotu. Takovéto materiály jsou uskladněny v chladničce se stálou teplotou 6-12 °C [12]. Správným způsobem skladování je nejen zpomalena přirozená degradace materiálu, ale lze

jím dosáhnout prodloužení životnosti a zpracovatelnosti. Například u kyanoakrylátových lepidel se při skladování v teplotách již okolo 30 °C zkracuje životnost až o 60-70 % [32]. Maximální doba skladování se řídí především pomocí expirační lhůty udávané výrobcem. Po jejím uplynutí se však i správně skladovaný materiál považuje za dále nepoužitelný, a je třeba jej tedy vhodným způsobem ekologicky zlikvidovat.

Teplota a vzdušná vlhkost nejsou jedinými degradačními vlivy, před kterými je třeba materiál chránit. Dalším příkladem je UV záření, které má neblahý vliv na vlastnosti izolací měděných vodičů, kabelů a obecně polymerních materiálů. Z těchto důvodů je třeba mít k dispozici technické listy od materiálů, ve kterých jsou, krom jiného, skladovací podmínky pro daný materiál jasně předepsány.

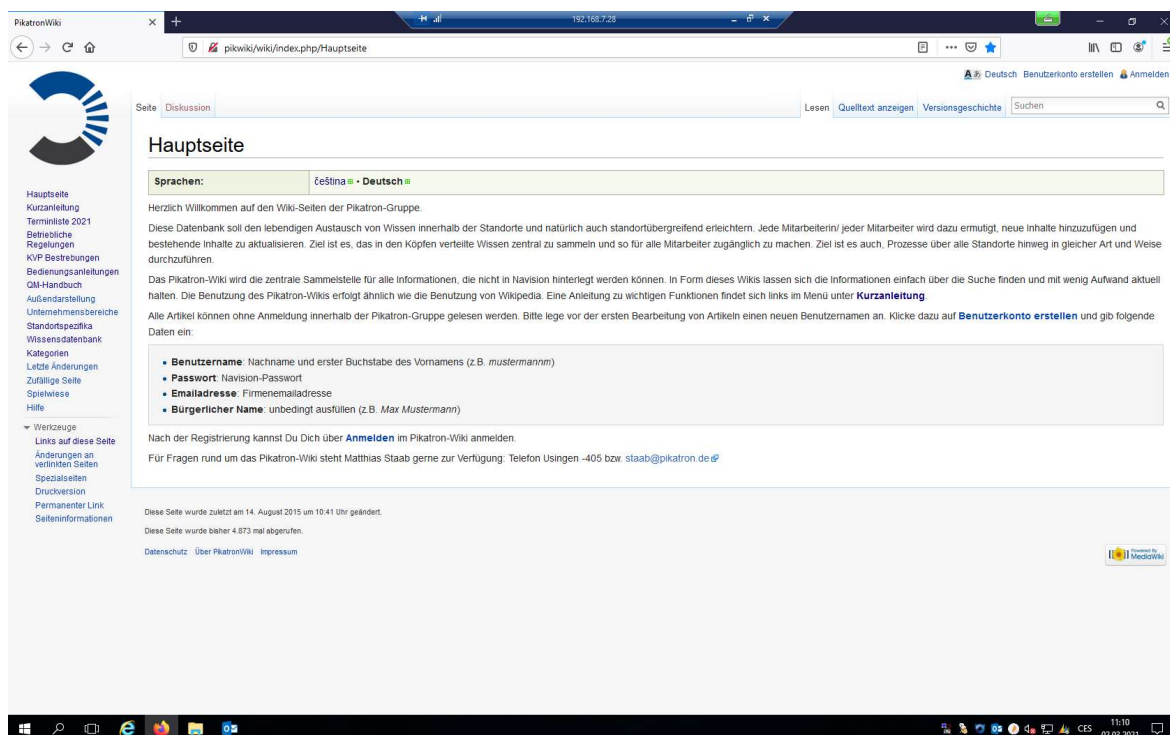
### 3.3 Kvalifikace personálu

Vzhledem k povaze výroby cívek, kde se i v současnosti značná část výroby provádí ručně, je zapotřebí personál odborně vzdělávat. O tomto vzdělávání je nutné vést patřičné a prokazatelné záznamy. Tyto záznamy bývají často spolu s dalšími dokumenty vyžadovány auditory při pravidelných kvalitativních auditech. Základním předpokladem kvalitní výroby je znalost obsluhy navíjecího stroje, procesu pájení, pracovního postupu i požadovaných kontrol. Tím vyvstává důležitost osobní zodpovědnosti každého operátora.

Obsluha navíjecích strojů bývá ve většině případů velice snadná a operátor si během několika prvních kusů rychle osvojí ovládání. Samotné nastavování a seřizování navíječky operátor svěřeno standardně nemívá. Zaškolení probíhá většinou v rámci výrobního závodu.

Složitější disciplínou je zvládnutí správného zhotovení pájeného spoje. Operátor se totiž musí podrobněji seznámit s teorií a návaznostmi v technologii pájecího procesu. Díky tomu je následně schopen správně zhodnocovat průběh tvorby pájeného spoje. Bez této průpravy dochází k učení metodou pokusu a omylu, což je velmi neefektivní. Vhodným způsobem vzdělávání v této oblasti jsou praktické semináře. Při nich se operátor seznámí s funkcí pájecích pomůcek, ale především s potřebnou teorií a přijatelnými stavy pájených spojů. Následně si pod dozorem lektora nabyté znalosti vyzkouší v praxi. Výstupem z těchto seminářů bývá taktéž záznam o školení, případně certifikace pracovníka.

Jelikož se výroba neustále modernizuje a spolu s tím se inovují i samotné produkty, je třeba udržovat výrobní dokumentaci neustále aktualizovanou. Taktéž personál je nutné se změnami vhodným a prokazatelným způsobem včas seznamovat. S tím souvisí i základní průprava čtení technické dokumentace. Ta musí být na každé výrobní lince standardně k dispozici. Ke sdílení informací o inovacích je ve firmách využíváno vhodných informačních prostředků. V rodině firem Pikatron je s úspěchem využívána databáze v prostředí Microsoft Dynamics NAV. Doplněna je o dvojjazyčný informační portál PikatronWiki – zkráceně PikWiki (na *obrázku 2*), kde mají řídicí pracovníci a management přístup k aktuálním výrobním informacím [12].



Obr. 2 Interní portál PikWiki ke sdílení informací v rámci rodiny firem Pikatron

### 3.4 Způsoby navíjení

Nejčastěji jsou při výrobě cívek využívána geometrická uspořádání lineární a toroidní. Dle tohoto principu lze rozdělit i navíjecí stroje. Těmito dvěma konstrukčními řešeními se práce dále hlouběji zabývá.

#### 3.4.1 Strojní navíjení lineárních cívek

První skupinou navíjecích strojů jsou lineární navíječky. Vzhled a funkci těch nejjednodušších lze principiálně přirovnat k soustruhu. Příkladem jednoduché univerzální lineární navíječky může být stroj ERN 22 od slovenské firmy TPC [33]. Základem takového stroje je otáčivé vřeteno s kleštinami, jehlový nebo kolečkový naváděč drátu

a řídicí jednotka, viz obrázek 3. Z důvodu jeho univerzálnosti je třeba jej pro navíjení konkrétního vyráběného typu cívky vybavit vhodným příslušenstvím. Nejnutnějším příslušenstvím je odvíječ drátu umístěný nad strojem a navíjecí trn. Ten se jedním koncem vkládá do kleštin vřetena a koncem druhým přesně kopíruje celou dutinu v kostře cívky. Samotná kostra se pak k takto provedenému trnu uchytlí vhodným způsobem, nejčastěji za pomoci šroubu. Mnohem častěji je však navíjecí trn dvoudílný, zejména z důvodu snadné a rychlé výměny již navinuté cívky za prázdnou kostru. V takovém případě je stroj vybaven i oporným koníkem s oporným hrotem.



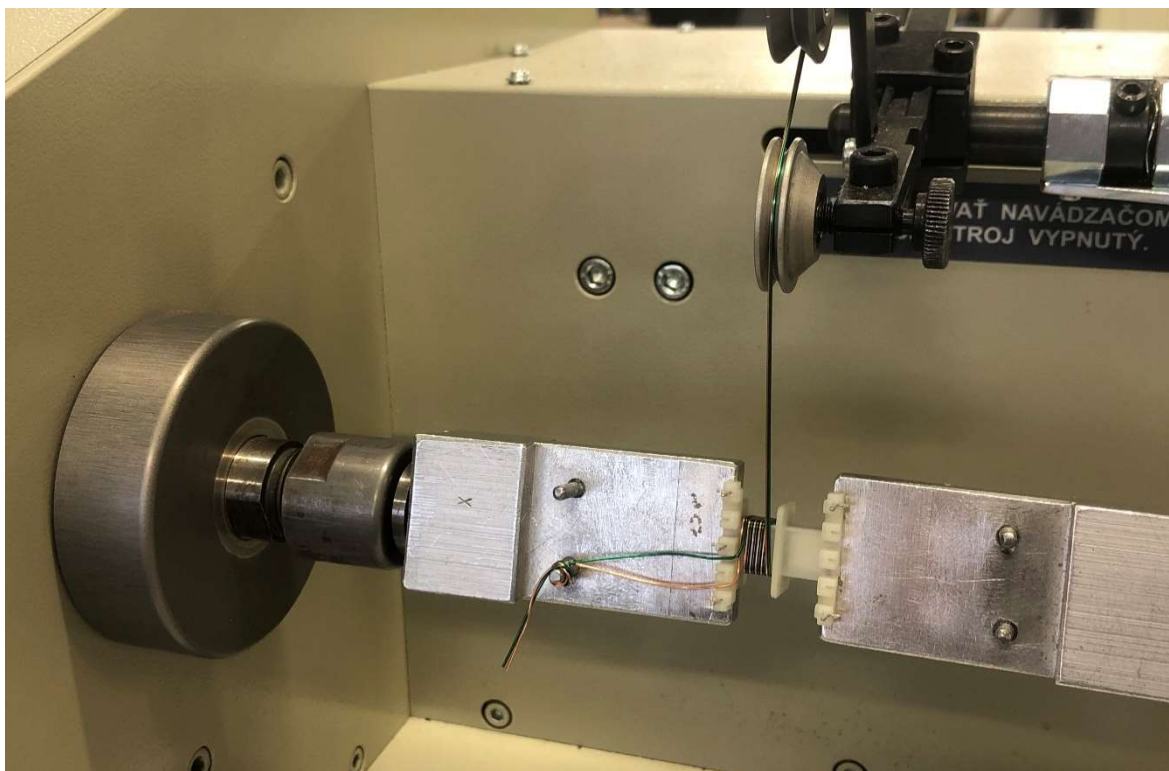
Obr. 3 Lineární navíjecí stroj TPC ERN 22 s příslušenstvím

Za pomoci odvíječe se nastavuje ideální brzdná síla určující napínací tah vodiče. Nastavením napínacího tahu odvíječe drátu je možno přímo ovlivnit mechanické i elektrické vlastnosti navíjené cívky. Pokud je nastavena příliš nízká brzdná síla, odvíječ neklade dostatečný odpor a návin na kostru je velice volný. Při větším počtu závitů na kostře se může navíjecí komora dokonce přeplnit a následně není možné osadit jádro. Při nastavení větší brzdné síly jsou závity na kostře více utahovány, spolu s tím se zlepší rozložení návínů. Díky čemuž není cívka při stejném počtu závitů tak objemná. Pokud je však brzdná síla nastavena příliš vysoká, dochází během návínů k podélnému zúžení průměru navíjeného vodiče. Tato deformace vodiče má za následek růst odporu podle vztahu (4), případně se drát během návínů přímo přetrhne.

Uváděný stroj ERN 22 je schopen dosáhnout rychlosti otáčení vřetena při odpovídajícím zpřevodování až 12000 ot/min. Z důvodu bezpečnosti je vybaven i štítem z plexiskla, jenž v případě uvolnění navíjeného dílu ochrání obsluhu před případným úrazem. Nutnost jeho uzavření lze podmínit v navíjecím programu a řídicí jednotka jej následně hlídá za pomoci magnetického spínače. Stroj na *obrázku 3* není tímto štítem osazen.

Řídicí jednotka v sobě uchovává navíjecí programy ve formě smyčky jednotlivých po sobě jdoucích kroků. Jednoduchý navíjecí program je možno sestavit za pomoci dvou základních pokynů ve třech krocích. Těmito pokyny jsou „přesun“ a „otáčení vřetena“. Prvním pokynem je „přesun“, kterým se ovládá samotný naváděč drátu. Tím je naváděč uveden do polohy, v níž začíná navíjecí komora kostry. Následuje pokyn pro otáčení vřetena, během kterého se provede nastavený počet závitů. Dalšími parametry tohoto kroku jsou rychlost a směr otáčení vřetena, rychlost posuvu naváděče drátu, šířka navíjecí komory, případně další parametry. Třetím pokynem je v tomto příkladě znovu pokyn pro otáčení vřetena, aby operátor mohl provést závěrečnou bandáž vinutí. Z popisu navíjecího programu vyplývá, že stroj nedovolí navinout nesprávný počet závitů či vynechat navíjecí krok. Všechny tyto multiplikativní chyby jsou tedy předem vyloučeny správným nastavením.

Na druhou stranu, jak již koncepce stroje napovídá, velký podíl práce zde vykonává obsluha. To bohužel otevírá obrovský prostor ke vzniku nahodilých chyb. Nejčastějšími z těchto chyb jsou vyvedení vodiče ke špatnému pinu na kostře, opomenutí vyvedení vodiče a pokračování v jeho navíjení spolu s bandáží a podobně. U složitějších typů cívek se může vyskytnout na jedné kostře větší počet vinutí, případně každé vinutí z vodiče jiného průměru. Tím vzniká riziko, že operátor omylem provede návin z nesprávného vodiče. Z tohoto důvodu je vhodné používat vodiče, jejichž lak je probarvený a operátora intuitivně navede ke zvolení správného vodiče. Využití barevných laků na vodičích je velice vhodné i při provádění bifilárního vinutí z vodičů stejných průměrů, kde se tímto razantně a velice snadno sníží riziko záměny vodiče a vyvedení ke špatnému pinu, viz *obrázek 4*. Drtivou většinu těchto chyb je možno shrnout do takzvané kategorie „lidského faktoru“, v jehož důsledku vznikají chyby nejčastěji z důvodu nepozornosti, nesoustředěnosti, a samozřejmě i případné únavy operátora. Z důvodu prevence těchto chyb je vhodné se zaměřit na složitější a automatizovanější navíjecí stroje.



Obr. 4 Provádění bifilárního vinutí za pomoci vodičů s barevným lakem

Příkladem takovéto automatizované navíječky jsou stroje italské firmy Marsilli [34]. Tyto navíjecí automaty v sobě kombinují jak činnost jednoduché navíječky, tak činnost operátora. Mnohem složitější je však sepsání navíjecího programu a samotné nastavení stroje, které již není možno shrnout do několika málo bodů jako v příkladě navíječky ERN 22. Navíjecí program pro automaty Marsilli běžně obsahuje i přes 300 příkazů. Je třeba totiž velice přesně naprogramovat veškeré pohyby, které v případě obsluhy jednodušší navíječky vykonává operátor.

Díky jasnému programu odpadají veškeré nahodilé chyby z kategorie lidského faktoru. Bohužel ani takovýto stroj není funkčně naprosto stoprocentní. Může dojít k tomu, že se vinutí nenavine z důvodu přetržení navíjeného drátu. Tuto závadu však lze neprodleně odhalit a vadný kus je z výrobního procesu okamžitě vyřazen.

### 3.4.2 Strojní navíjení toroidních cívek

Návin toroidních cívek se v mnoha ohledech velmi liší od návinu lineární cívky. Stejně tak se stává technicky složitější samotná navíječka a přibývá parametrů, které je třeba sledovat a během navíjení korigovat.

Základní odlišností od navíjení lineárních cívek je rozdílný způsob uchycení a pohybu opory vinutí. Taktéž neprobíhá návin na cívkové těleso, ale přímo na jádro. To je uchyceno v soustavě tří otáčivých držáků, které se nazývají rolny. Za pomoci jejich rotačního pohybu se během návinu jádrem otáčí. Ty jsou seskupeny v takzvaný stolek, který je považován za příslušenství k navíječce a jeho rozměry udávají možný rozměr upínaného jádra, viz *obr. 5*.



*Obr. 5 Navíjecí ústrojí toroidní navíječky RUFF RWE Evolution*

Z důvodu uzavřenosti jádra a potřeby provlékat vodič jeho středovým otvorem je nutné použití zásobníku drátu, takzvaného magazínu. Jedná se o otevíratelný ocelový kruh s průřezem tvaru písmene U, který je upnut v druhé soustavě rolen. Ty jsou také mechanicky seskupeny v jeden výměnný celek, který se nazývá navíjecí hlava a je též zachycen na *obrázku 5*.

Samotný průběh navíjení je možno shrnout do několika málo operací. Prvním úkonem je otevření magazínu a následné navléknutí toroidního jádra, které se poté sevře mezi rolny navíjecího stolku a magazín se uzavře. K magazínu se následně uchytí vodič a zpětným chodem magazínu se navine do jeho vnitřního prostoru dostatečné množství vodiče pro vytvoření jednoho sektoru vinutí. V dalším kroku se směr otáčení magazínu obrátí a vodič se z něj již navíjí na samotné jádro, které se pomalu otáčí. Po navinutí požadovaného počtu závitů se přeruší vodič mezi cívkou a magazínem a případný zbytek vodiče se z magazínu



odstraní. Po jeho rozevření se vyjímá navinutá cívka. Podobným způsobem se zhotovuje základní i povrchová bandáž. Je však třeba vyměnit navíjecí hlavu za takovou, která je určena k navíjení izolačních materiálů, nikoliv vodiče.

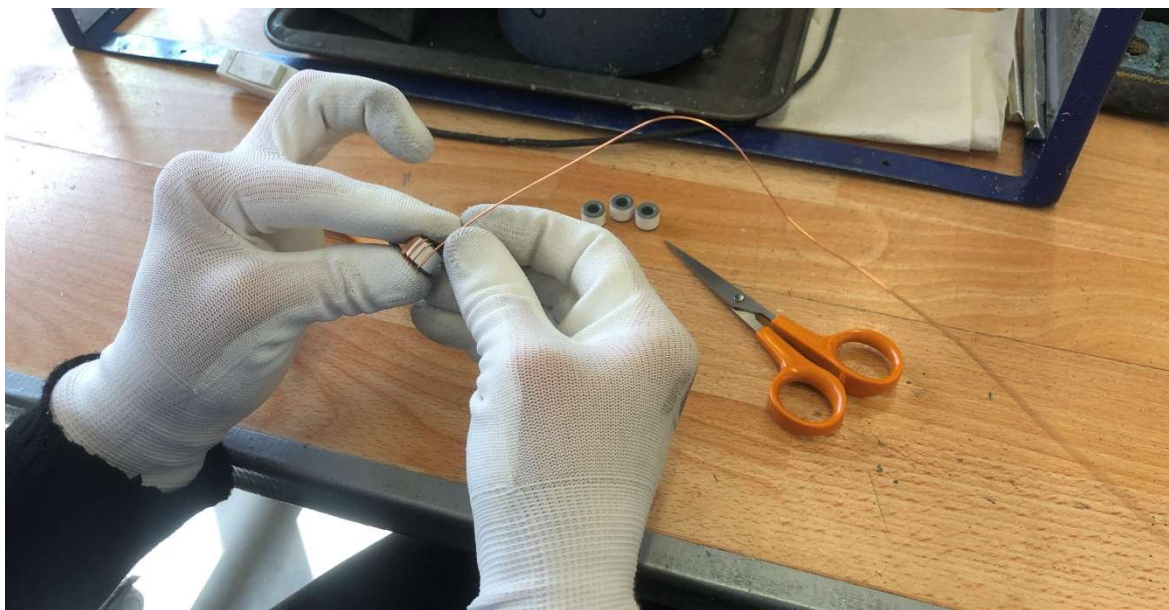
Jak vyplývá z výše uvedeného popisu navíjení toroidní cívky, je nutno správně zvolit rychlosti otáčení jádra i magazínu, správný počet závitů vodiče do magazínu i na jádro, míru utažení drátu na jádro a podobně. Příkladem starší konstrukce toroidních navíječek jsou americké automatické navíječky Gorman 900A [35]. U těchto využití automatického chodu znamená nastavení samostatného přepínání směru otáčení jádra. Toho je vhodné využívat u navíjení sektorů nebo cívek s velkým počtem závitů, které se navíjejí delší čas. Ten může obsluha využít například ke zpracovávání předchozího navinutého dílu.

Moderní toroidní navíječky již využívají řídicích jednotek, podobně jako je tomu u navíječek lineárních. Příkladem může být toroidní navíječka RWE Evolution od německé firmy RUFF [36]. V řídicím programu je pro takovou navíječku definován sled navíjecích kroků, ve kterých jsou naprogramovány směry a rychlosti otáčení, rozběhové rampy apod. Jejich nastavení je tedy komplexnější a nalézají uplatnění při navíjení autotransformátorů či toroidních cívek obsahujících větší počet vinutí v různých vzájemných pozicích.

I v tomto případě vykonává značnou část práce obsluha stroje. Bohužel, z podstaty toroidních navíjecích strojů je konstrukce úplného automatu velice obtížná. S plně automatickými toroidními navíječkami se tedy lze setkat jen velmi zřídka.

### 3.4.3 Ruční navíjení

Nelze opomenout fakt, že ve výjimečných případech je velice vhodné cívky navíjet zcela ručně bez zásahu jakékoliv strojní navíječky, jak je zachyceno na *obrázku 6*. K tomuto řešení se výrobce uchyluje především v případech, kdy je toroidní jádro svou velikostí nevhodné pro strojní navíjení při dané vybavenosti dílny, nebo jsou kladeny velmi přísné kvalitativní nároky na provedení návínů. S tímto výrobním řešením však přichází i notná úskalí. Především absolutní podíl lidské práce. S každou manuálně prováděnou operací vzrůstá riziko lidské chyby. Jak v prostém počtu závitů, kdy se operátor jednoduše „přepočítá“, tak i v celkovém provedení. Proto je třeba dbát na velmi důsledné proškolení operátorů a jejich pečlivou kontrolu.



Obr. 6 Ruční navíjení toroidní cívky

### 3.5 Uvolnění prvního kusu a výroba

Před uvedením jakkoliv velké série dílů do výroby je potřeba provést důkladné ověření správnosti veškerých nastavení strojů i samotného výrobního procesu. Nejčastěji se tak činí „uvolněním prvního kusu“, což je v podstatě kombinace typové a mezioperační zkoušky. Na začátku každé nové výrobní operace se provádí pečlivé přezkoumání vlastností dílu a další operace je umožněna až po shledání bezzávadového stavu. Například návin je umožněn až po přeměření orientací a počtů závitů jednotlivých vinutí, připájení vývodů vinutí k pinům po kontrole a jejich vyvedení ke správným pinům apod. Mezi kontrolované parametry patří mechanické i elektrické vlastnosti jako indukčnost  $L$  nebo odpor  $R$  atd.

Po správném výchozím nastavení výrobního procesu a jeho uvolnění začíná fáze sériové výroby. Po správně provedeném uvolnění série jsou vyloučeny multiplikatívni neboli systémové chyby. Nejen díky odpovídajícím navíjecím programům, ale také díky vhodnému zpřípravkování výroby je možno operátorovi napomocť provádět na všech kusech výrobní operaci stejným a korektním způsobem za odpovídající čas. Pokud se nevyskytne nějaká mechanická závada na navíječe nebo přípravku, která unikla operátorově pozornosti, vyskytují se ve výrobě již pouze ojedinělé chyby, kterým bohužel nikdy nelze zcela zamezit. Samozřejmou snahou je však jejich počet zmenšovat.

## 3.6 Průběh výroby operátorem a jeho kontrola

### 3.6.1 One piece flow

Výroba v režii operátora probíhá nejčastěji způsobem One piece flow [37]. Operátor střídá výrobní a kontrolní operace tak, aby na každém dílu provedl maximum výrobních kroků, a až následně započal výrobu dalšího kusu. Výrobci se k tomuto výrobnímu schématu uchylují z důvodu optimalizací a změn ve výrobě, kdy může docházet i k technickým změnám na vyráběných dílech. Metoda One Piece Flow napomáhá velkým dílem ke zpřehlednění, zkvalitnění a časové flexibilitě výroby. Především díky tomu, že se nevyrábějí díly, které by jinak zůstaly rozpracované, ale rovnou dochází k jejich finalizaci. V případě poruchy navíječky či přípravku se tak zamezí vyrobení většího počtu neshodných dílů. Operátor totiž dokáže časněji odhalit nesrovnalost a přerušit další výrobu. V případě, že by nebylo využíváno One piece flow, hrozilo by odhalení neshodných dílů až při započetí dalšího výrobního kroku. V nejhorším případě by byla celá výrobní série zhotovena se systémovou chybou.

### 3.6.2 Návin a cínování

Samotný průběh výroby je odvozen od povahy a potřeb jednotlivých konkrétních dílů. Základem je však návin vodiče na kostru, případně na toroidní jádro a doplnění o potřebné bandáže. U již navinutého dílu se následně provádí předcínování vývodů vinutí. V případě zesílených izolací je třeba vodič nejdříve mechanicky odizolovat. Předcínování vývodu vinutí je vhodné zejména z důvodu snazšího a rychlejšího vytvoření pájeného spoje s pinem. Díky tomu nedochází k zásadnímu poškození kostry cívky zvýšenou teplotou cínovací lázně. Pocínované vývody vinutí jsou následně připevněny ovinem k jednotlivým pájecím místům na pinech. Poté jsou připájeny hrotovou páječkou či opětovným ponorem do cínovací lázně. Během cínování však dochází k rozstříkům pájky a vzniku takzvaných „cínových perel“, které na dílu ulpívají. Jejich přítomnost může porušovat minimální izolační vzdálenosti, případně rovnou zkratovat jednotlivé vývody. Proto musejí být z dílů odstraněny.

### 3.6.3 Osazení jádry

Zpracovávaný díl je následně umístěn do měřicího přípravku, který je připojen k LCR měřiči. Osazení jádry je tedy vhodné provádět za stálého připojení cívky k měřáku, přičemž operátor během lepení vidí na měřidle hodnotu  $L$  a může ji změnou upínacího tlaku vyladit

v rámci tolerance na optimální hodnotu. Doporučený optimální upínací tlak pro ferity je  $700 \text{ kg/m}^2$  [6]. Operátor však jádra lepí ve většině případů ručně či za pomoci svorek, kdy není možno upínací tlak přesně sledovat. Růst  $L$  s rostoucím upínacím tlakem je způsoben vytlačováním většího množství lepidla ze styčné plochy mezi jádry. Další výhodou tohoto způsobu osazování feritů je stoprocentní využití mezioperační kontroly. Díl osazený jádry je odeslán k závěrečné kontrole, případně je dále připravován pro procesy impregnace nebo zapouzdření.

### 3.6.4 Impregnace a zapouzdření

Z hlediska příprav chemikálií na následné procesy pouzdření je důležité zbavit zalévací pryskyřice i díly samotné obsažené vlhkosti. Obsažená vlhkost může mít za následek vznik mikroskopických vzduchových bublinek a dalších nehomogenit. V jejich důsledku je zvýšené riziko následného vzniku částečných výbojů uvnitř dílu a tím i zkracování životnosti celého koncového zařízení.

Samotné procesy impregnace a zapouzdření jsou si velice podobné. Rozdíl je především v používaných materiálech a jejich přípravě. Impregnace dílů se provádí jednosložkovými impregnačními pryskyřicemi, do kterých je díl ponořen, a snížením okolního tlaku za pomoci vývěvy je z dílů odsát vzduch. Tím dojde k lepšímu zatečení impregnační pryskyřice do mezizávitových prostor. Následně je nutno před vytvrzením pryskyřic nechat jednotlivé díly okapat.

Proces zapouzdření je velice podobný, ale využívá se dvousložkových zalévacích pryskyřic. Pro proces zapouzdření jsou díly vkládány do odpovídajících krabiček a následně temperovány. Po vytemperování na předepsanou teplotu je do dílu nalito potřebné množství homogenizované zalévací pryskyřice a snížen okolní tlak, aby zálivka vyplnila veškerý vnitřní prostor. Vytvrzování probíhá dle pokynů výrobce konkrétní zalévací pryskyřice.

Největším problémem obou procesů je čistota dílu. Nezřídka se totiž dostane zálivka nebo lak na piny a je zapotřebí je následně očistit. Kdyby k očistění nedošlo, bude takový povrch nepájitelný, což by znamenalo velké problémy při procesu osazování dílu do desky plošného spoje.

### 3.6.5 Kusová zkouška a další kontroly

Po vytvrzení impregnací a zálivek jsou díly podrobeny kusové zkoušce, při které jsou měřeny veškeré jejich předepsané elektrické a mechanické parametry. Elektrické nejčastěji za pomoci měřících automatů. Ty dokážou změřit veškeré požadované parametry během jedné operace. Po úspěšném zvládnutí kusové zkoušky je díl označen odpovídajícím potiskem či etiketou a vhodně zabalen, aby nedošlo k jeho poškození během přepravy.

Během výroby dochází k častým namátkovým kontrolám, které mají za úkol odhalovat nedostatky vznikající již během výroby a motivovat operátory k důsledné sebekontrolě a odpovědnému vykonávání veškerých operací. V ideálním případě je během namátkových kontrol pouze zkonstatována shodnost s výrobním předpisem kladným výsledkem takovéto kontroly. V praxi je ale během většiny kontrol odhalen nějaký nedostatek, který je následně posouzen a na jeho základě optimalizován výrobní proces.

Před samotnou expedicí dochází k namátkové kontrole, která je rozsahem totožná či velice podobná kusové zkoušce. Často se postupuje metodou AQL [31], kdy je simulována přejímka zboží zákazníkem. V případě odhalení nedostatku má expediční kontrolní technik zpravidla pravomoc expedici znemožnit a vrátit zakázku k přepracování.

## 4 Způsoby měření

Klíčovým aspektem zjišťování kvality navíjení cívek je měření požadovaných vlastností, které je následně deklarováno. Měření je možno rozdělit na dvě základní kategorie, měření mechanických parametrů a měření parametrů elektrických.

### 4.1 Elektrické vlastnosti

Měření elektrických parametrů vypovídá mnohé o předchozím průběhu výroby daného dílu. Právě z toho důvodu je měření elektrických vlastností během výroby i několikrát opakováno v různých výrobních fázích.

Mezioperační kontroly jsou veškerá měření, po kterých následují další výrobní operace. Jedná se o kontroly počtů a polarit závitů, indukčnosti  $L$ , odporu  $R$  nebo činitele jakosti  $Q$ . Například za pomoci stolních LCR měřičů Agilent 4263B, Kust LM1010A či obdobných přístrojů. Díky těmto kontrolám, které je ideální provádět na 100 % dílů, je možné včas odhalit závadový díl a vyřadit jej z výrobního procesu. Měření v drtivé většině případů probíhá za použití měřících sond ve čtyřvodičovém zapojení. Velice vhodné je využívat metodu One piece flow [37], díky které jsou mezioperační kontroly přehlednější.

Měření elektrických rozměrů značně komplikuje skutečnost, že operátorské činnosti v elektrotechnické výrobě zastávají z velké části osoby s velmi povrchním, až takřka nulovým elektrotechnickým vzděláním. Z tohoto důvodu jsou výrobní firmy nuceny uchýlovat se používání měřících automatů. Příkladem mohou být automatické měřiče počtu závitů DMC Electron DMT-108 pro lineární a DMC Electron DMT-208 pro toroidní cívky. Dále pak přístroje Voltech ATi a Voltech AT3600 [38], které zvládnou během jednoho měření změřit veškeré předepsané parametry. Těmto automatům nedělají problém vlastnosti jako jsou  $L$ ,  $R$ ,  $Z$ ,  $Q$ ,  $C$ , poměr závitů, orientace vinutí a v případě přístroje AT3600 i provádění vysokonapěťových testů. Pro operátora je obsluha velice snadná, neboť stačí do přístroje nahrát předem připravený měřící plán, vložit díl, spustit měření a následně počkat na výsledek měření ve formátu PASS – FAIL. Následně se automaticky vytvoří protokol s výsledky měření, které je možné dále analyticky zpracovat. Veškerá rozhodovací činnost je plně automatická, čímž je minimalizován vliv lidského faktoru.

Další kategorií běžně používaných měřidel jsou vysokonapěťové měřáky. Za pomoci dvojice sond se měří odolnost vůči předepsané napěťové hladině po předepsaný čas. Pokud je průrazné napětí izolace dílu nižší než předepsané měřicí napětí, je díl vyřazen, neboť pro něj byla zkouška destruktivní.

Standardním měřidlem pro určení fázového posunu vyvolávaného cívkou je osciloskop. Za jeho pomoci se zjišťuje taktéž zkresení signálu.

Stále častěji je při výrobě cívek kladen důraz na problematiku částečných výbojů. Správná interpretace diagnostických dat z měření částečných výbojů dokáže odhalit mikroskopické nehomogenity, vzduchové bublinky a nečistoty v izolačních materiálech apod. Všechny tyto aspekty poukazují na špatně nastavený výrobní proces.

## 4.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti dílu jsou zadané technickým výkresem ve výrobní dokumentaci, velice často doplněným o bodové vysvětlující poznámky pro upřesnění a absolutní jednoznačnost. V drtivé většině měření mechanických parametrů si operátor vystačí se standardním posuvným měřidlem, případně ocelovým rovným pravítkem v případě delších výrobků. Měří se například délky drátových vývodů, délka jejich ocínované části, délky pinů, výška zalitých dílů, šířka a výška návinu toroidní cívky apod.

Velké zjednodušení a urychlení práce přinášejí nejrůznější přípravky a šablony, které nacházejí uplatnění v opakující se sériové výrobě a jasně definují mezní limity pro přijatelnost dílu. Může se jednat o nejrůznější prostrkávací šablony, zastříhovací měřky, rastrové šablony apod. Při vhodném zpřípravování výrobního procesu se poté operátor zcela obejde bez jakéhokoliv cejchovaného měřidla.

Hmotnostní parametr se u cívek málokdy měří či požaduje, nicméně i zde existují výjimky, kdy je maximální hmotnost dílu jasně předepsána. Většinou bývá tento požadavek předepsán u produktů určených pro vojenský či letecký sektor.

Požadavky na mechanické provedení jsou často normalizovány. Příkladem takovýchto norem jsou dokumenty IPC-J-STD-001, IPC-A-610 a IPC/WHMA-A-620 [39][40], zabývající se kritérii přijatelnosti pájených spojů, elektrických sestav a kabelových svazků.

Obsahem normy IPC-A-610 je standardizace metod a definice podmínek, podle kterých se rozhoduje o přijatelnosti dílu. Především je však zpracována jako obrázková kniha ilustrující přijatelné a závadové stavy pro vizuální kontrolu, takže je její používání velice intuitivní.

Jelikož se jedná o normu zaměřenou na vizuální kontrolu, tak je patřičné zmínit, že tato kontrola má jasně definovaná kritéria. Především osvětlení prostor, kde je kontrola prováděna a největší přípustné kontrolní zvětšení, pod kterým je možno díl kontrolovat. Ne vždy je totiž k řádné kontrole dostačující pouze lidský zrak. Využívá se tedy vhodných zvětšovacích pomůcek, ať už klasických mikroskopů či digitálních zvětšovacích zařízení, jako jsou například výrobky firmy Tagarno [41]. Pokud si ani po kontrolním zvětšení není kontrolní pracoviště jisté výsledkem kontroly, přistupuje toto k rozhodovacímu zvětšení, které zdůrazní nedostatky zkoumaného dílu mnohem detailněji [40]. I toto zvětšení je však omezeno. Při nepřiměřeném zvětšení by kontrolor byl nucen u drtivé většiny dílů rozhodnout o jejich vyřazení.

Všechny výše zmíněné kontroly mechanických parametrů jsou nedestruktivní. Zástupcem destruktivních kontrolních metod je tahová zkouška krimpovaného nepájeného spoje. Takový spoj tvoří nakrimpovaná – nalisovaná – kabelová koncovka na lankovém vodiči [42]. Při této zkoušce se měří síla, která je potřebná ke stržení nakrimpované koncovky z vodiče. Provádí se speciální trhačkou a na základě zjištěné potřebné síly se upravují parametry krimpovacího stroje a tím i celý krimpovací proces. Stržený krimp není možné znovu použít. Vícenásobné zmáčknutí krimpu je považováno za závadu.



## 5 Výrobní vady, jejich příčiny a opatření

### 5.1 Multiplikativní systémové chyby

Chyby, které se objevují na všech dílech výrobní série, se označují jako systémové. Při zavádění nové výroby či změně výrobního postupu může dojít ke špatnému nastavení navíjecího stroje, který následně přenáší chybu napříč celou výrobní sérií. To je však příčinou velice ojedinělou. Častější příčinou vedoucí ke vzniku systémových vad je opotřebenost přípravků a pomůcek, používaných během výroby. Během jejich používání dochází k postupnému zvětšování vůlí a změně rozměrů. Kupříkladu používání příliš opotřebené zastřihovací šablony má za následek, že veškeré vývody zhotovené podle této šablony jsou příliš krátké. Uvolněním výrobní série a mezioperačními kontrolami jsou však takovéto nedostatky záhy odhaleny a je včas přistoupeno k jejich odstranění.

V reálném provozu však dochází k častému střídání operátorů na jednotlivých výrobních operacích. Tím vyvstává riziko, že během změny operátorů mezi nimi dojde ke špatnému či neúplnému předání informací. Po jejich vystřídání je zvýšené riziko výskytu dílů vyrobených v nesouladu s výrobním postupem. Dodržováním metody One piece flow lze takovéto chyby včas zachytit a jejich příčinu odstranit.

### 5.2 Nahodilé chyby

Chyby vzniklé na jednom konkrétním kusu jsou označovány jako nahodilé. Takovéto chyby jsou z hlediska kontroly kvality mnohem složitější ke kontrole a zejména k odhalení. Jejich vzniku se bohužel nedá nijak plošně zamezit, ale vhodným nastavením výroby a přípravkováním lze jejich výskyt značně omezit.

K nahodilým chybám dochází z nejrůznějších důvodů. Může se jednat o vadu vstupního materiálu, která nebyla odhalena při statistické přejímce metodou AQL, a operátor, který materiál zpracovává, tuto vadu nezaznamenal. V takovém případě se velice často jedná o poškození feritových jader, jak zachycuje *obrázek 1*, chybějící pin v kostře lineární cívky, zdeformovanou krabičku apod. Z důvodu těchto ojedinělých vad vstupních materiálů je velice důležité, aby operátor před zahájením jakéhokoliv výrobního kroku podrobil materiál minimálně vizuální kontrole, neboť se většinou jedná o vady mechanického charakteru.

### 5.2.1 Chyba operátora – lidský faktor

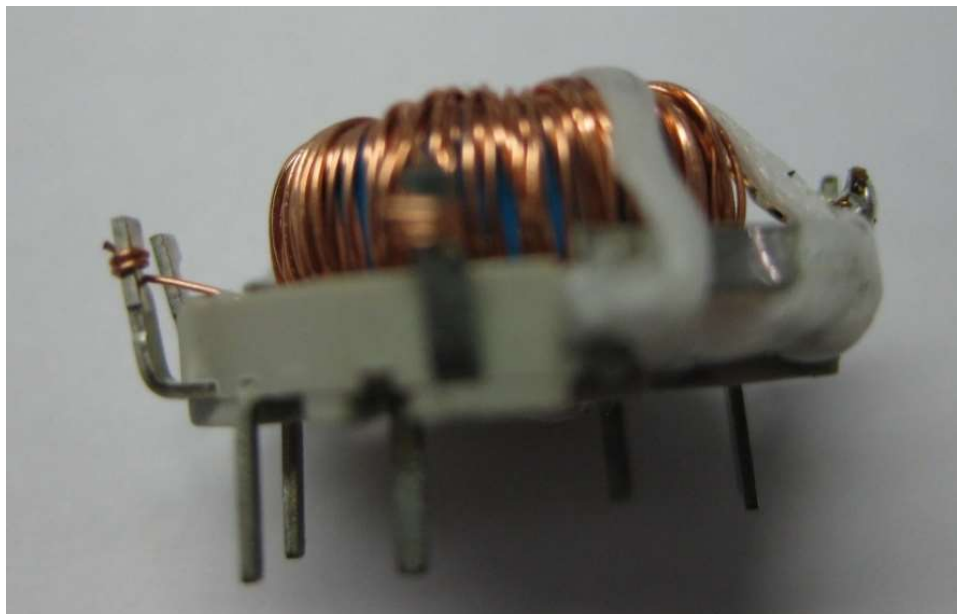
Nejčastějším důvodem vzniku nahodilých chyb je však prostá chyba operátora a takovéto nahodilé chyby je možno připsat působení lidského faktoru. Tyto chyby vznikají často v důsledku únavy, neschopnosti udržet soustředěnost na prováděnou práci, odvedení pozornosti jiným operátorem či jiným rušivým vlivem. Mezi takovéto chyby lze zařadit přeskočení výrobní operace, vyvedení vývodu vinutí ke špatným pinům, vložení navinuté cívky do krabičky ve špatné pozici (posun o 90° nebo 180° vůči označení) apod. Většinou jsou tyto chyby mechanického charakteru. Z těchto důvodů je snaha výrobních firem rušivé vlivy omezovat, ale zcela zamezit jim bohužel nelze.

Nahodilou chybou vzniklou působením lidského faktoru může být příklad z *obrázku 7*, kdy je návin toroidní cívky v rozporu s výrobní dokumentací. Ta v tomto případě vylučuje křížení navíjeného vodiče na toroidním jádře. Jak vidno na *obrázku 7*, tak operátor tohoto nedbal a díl, u kterého došlo k překřížení vodiče, postoupil k dalším dokončujícím operacím. To dokládá finální značení formou černé tečky na pouzdře toroidního jádra. Vlnka na vodiči v dolní části fotografie je taktéž u tohoto konkrétního produktu považována za závadu.

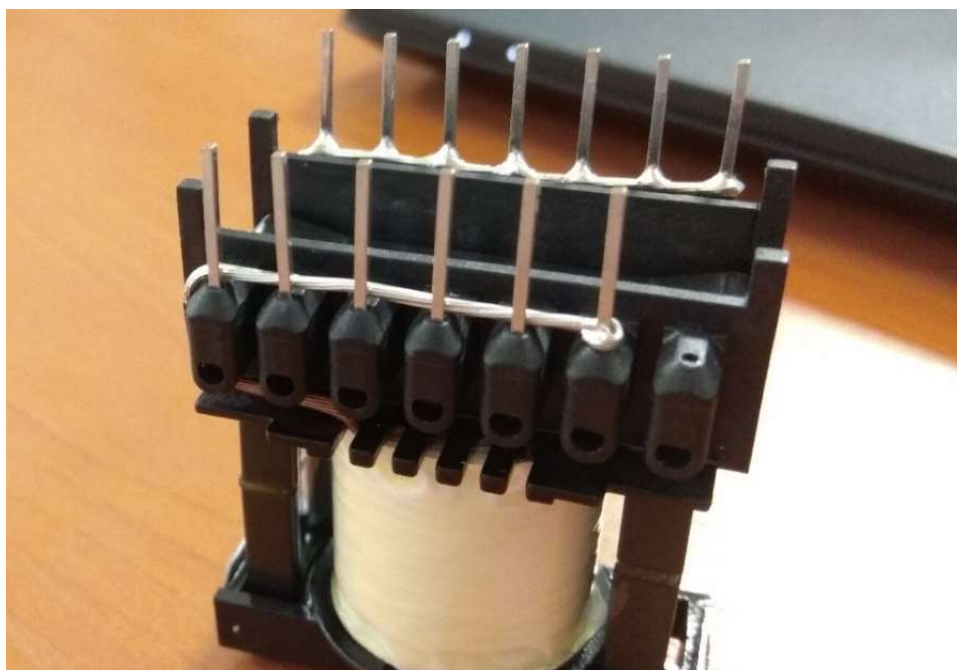


Obr. 7 Zkřížené vodiče vinutí

Častou přeskokovanou výrobní operací z důvodu působení lidského faktoru je paradoxně jedna z těch nejdůležitějších, a to vytvoření pájeného spoje. Z výsledků mezioperačních zkoušek ve firmě Pikatron CZ je patrné, že operace pájení bývá přeskokována pouze částečně. Pájené spoje totiž bývají vytvořené, ale zpravidla chybí jeden pájený spoj, či zapájet jednu stranu cívky. Díly zachycené s touto vadou jsou zdokumentovány na *obrázcích 8 a 9*, kdy chyba dílu z obrázku 9 je považována za závažnější.



Obr. 8 Nezacínované vývody



Obr. 9 Neprocínované vývody

U dílu z *obrázku 9* bylo korektním způsobem provedeno předcínování vysokofrekvenčního lankového vodiče s PA opletem pomocí ponorné cínovací lázně. Stejně tak vyvedení konců vinutí a ovin posledního pinu v souladu s výrobní dokumentací, avšak vytvoření pájeného spoje hrotovou páječkou bylo provedeno jen na jednom vývodu vinutí. Tato závada je považována za závažnější především z důvodu vodivého propojení vývodu s pinem, kdy by i tento díl prošel elektrickou kontrolou pravděpodobně bez větších obtíží. Oproti tomu díl zdokumentovaný na *obrázku 8* by elektrickou zkouškou projít nemohl, neboť vývody vinutí nejsou odizolovány a k vodivému spojení s piny vůbec nedošlo.

Stejně závažnou závadou jako absence pájeného spoje je i jeho nadbytečnost. Nepředepsané pájené spoje jsou často tvořeny můstky cínové pájky, kdy dochází k vodivému propojení pinů, které být propojeny nemají. Na *obrázku 10* je zachycen příklad takového můstku.



*Obr. 10 Cínový můstek mezi osazeným a neosazeným pinem*

Další forma závad zahrnutá do lidského faktoru je nedbalost při montáži jednotlivých komponentů cívky. Na *obrázku 11* jsou zachyceny cívky, kdy jejich primární závadou je vzájemné pootočení polovin hrníčkového jádra, od kterého se odvíjejí závady následné. Cívka s takto sesazeným jádrem totiž nemůže vykazovat předepsané vlastnosti  $L$ . Nedochozí totiž ke korektnímu uzavření magnetického obvodu cívky. V důsledku čehož je vlastní indukčnost  $L$  příliš nízká. Oprava těchto dílů ve formě sundání třmenu, otočení jader do správné polohy a následném opětovném nasazení třmenů zajistila, že obě cívky vykazovaly předepsané elektrické vlastnosti.



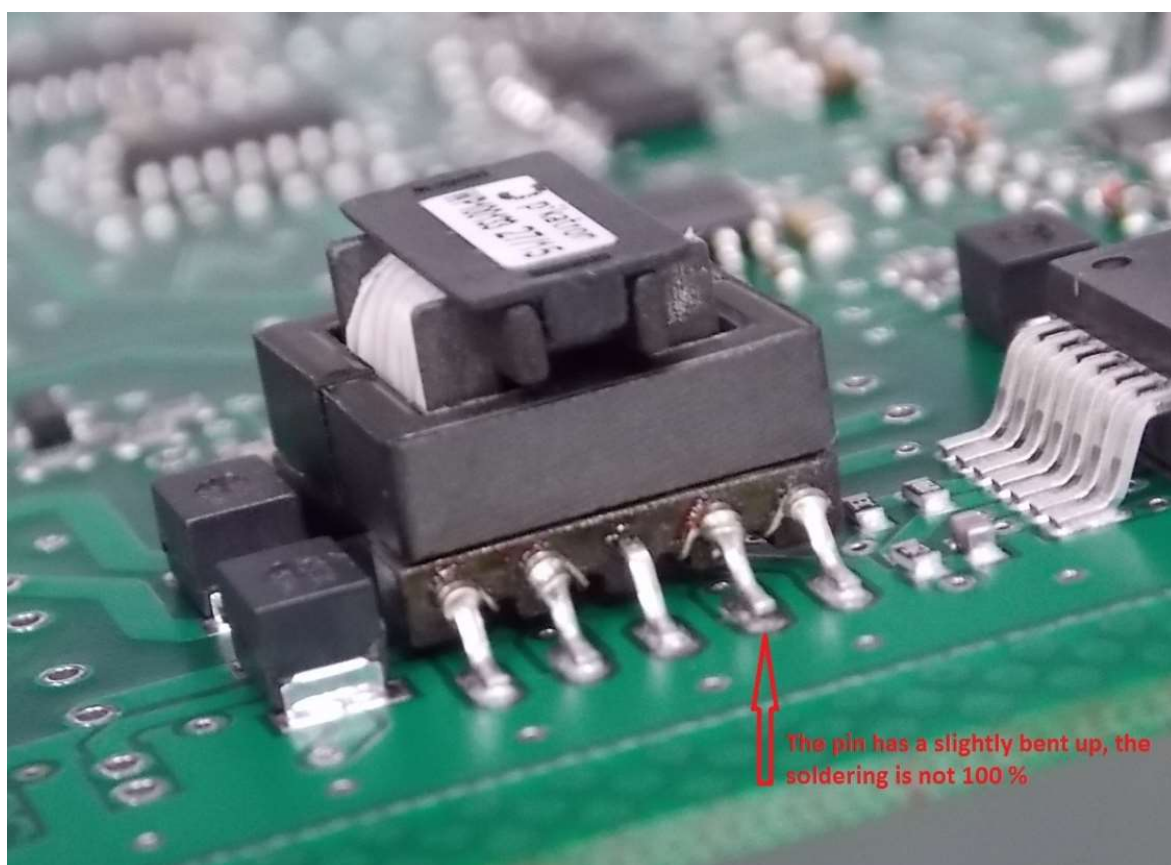
Obr. 11 Nedbale zaferitovaná cívka

Podobná nedbalost však nemusí být vždy opravitelná, jak zachycuje *obrázek 12*. V důsledku slepení jednotlivých komponentů cívky je jejich následná demontáž zcela neproveditelná. V tomto konkrétním případě byla kolmost vlepení toroidní cívky do krabičky závislá pouze na lidském faktoru a v důsledku jeho selhání bylo přistoupeno k vhodnému zpřípravování výroby. Opatřením proti opakování této závady bylo vytvoření vhodného přípravku, zajišťujícího cívce oporu během lepení, díky čemuž se již tato chyba na konkrétním typu produktu již nemůže zopakovat.



Obr. 12 Do krabičky nedbale osazená toroidní cívka

Neméně důležitý je vliv výběru konkrétního operátora pro danou výrobní operaci či produkt. Ze zkušeností ve firmě Pikatron CZ s. r. o. je více než patrné, že ne každý operátor je schopen vykonávat veškeré pracovní úkony ve stejné kvalitě. Je proto lepší operátorům svěřovat takové činnosti, u kterých je již z minulosti prověřena jejich spolehlivost. Tím lze výrazně snížit riziko vzniku závadových dílů. Nejvíce je tento vliv patrný na výsledcích ručního zhotovování pájených spojů hrotovou páječkou, dodržování mechanických parametrů a výsledné čistotě dílu. Tvrzení, že „každý může dělat všechno“, je tedy liché a vhodným výběrem operátora lze ušetřit nemálo času, promarněného materiálu a především peněz, a minimalizovat tak zákaznické reklamace. Příkladem budiž *obrázek 13*, zachycující zákaznickou reklamaci SMD dílu, u kterého nebyly piny správně srovnány. Jejich nedostatečná koplanarita vyústila v zákaznickou reklamaci z důvodu neosaditelnosti tohoto dílu standardním automatizovaným procesem v zákaznickově výrobním závodě. Zajištění koplanarity je taktéž operace, kterou nelze svěřit libovolnému dostupnému operátorovi z důvodu potřebné preciznosti a zrakových schopností.



Obr. 13 Zákaznická reklamace – Špatně srovnané piny

## 5.2.2 Nevyhovující mechanické parametry

Z dat založených na dlouhodobém pozorování ve firmě Pikatron CZ s. r. o. vyplývá, že většina kvalitativních nedostatků, zaznamenaných během kvalitativních kontrol, jsou nahodilé chyby mechanického charakteru. Zejména poškození či čistota dílu, nedodržení rozměrů nebo nevyhovující provedení pájených spojů. To potvrzuje tezi, že při správném nastavení výrobního procesu se multiplikativní systémové chyby vyskytují jen velice zřídka. V *tabulce 1* jsou zachyceny počty provedených expedičních kontrol ve firmě Pikatron CZ s. r. o. a následných zopakování kontrol v mateřské firmě Pikatron GmbH v německém městě Usingen metodou AQL v časovém období od července roku 2020 do února 2021.

Tabulka 1: Přehled expedičních kontrol

Měsíc	Kontrolovaných zakázek při expedici	S nedostatky	El. nedostatky	Mech. nedostatky	Reklamacie z Usingenu	El. nedostatky	Mech. nedostatky
červenec 2020	56	12	0	12	10	0	10
srpen 2020	37	7	0	7	4	0	4
září 2020	61	14	0	14	3	0	3
říjen 2020	50	6	0	6	11	2	9
listopad 2020	58	11	0	11	2	0	2
prosinec 2020	29	12	1	11	0	0	0
leden 2021	61	12	1	11	3	1	2
únor 2021	69	15	1	14	0	0	0

Majoritní podíl na mechanických závadách má při expedičních kontrolách čistota dílu, kdy jsou z dílů s nedostatečnou důkladností odstraněny rozstříky cínové pájky, tzv. cínové perly. Mechanické poškození dílu či nedodržení rozměrů se vyskytuje velmi zřídka. Důvodem k přepracování dílů z hlediska nedodržení rozměrů bývá nejčastěji zajištění koplanarity vývodů SMD dílů. V dnešních dnech se tento parametr ve firmě Pikatron CZ s. r. o. zajišťuje ručně za pomoci měrek příslušných tloušťek, konkrétně 0,1 mm. Z důvodu aktuálního nesystémového řešení a velkého vlivu lidského faktoru by bylo vhodné do výrobního procesu zařadit vhodnou technologii určenou pro kontrolu a zajištění koplanarity tohoto druhu dílů. Tím by se předešlo podobným reklamacím, jak je zachyceno na *obrázku 13*.

### 5.2.2.1 Mechanické poškození dílu

Mechanické poškození dílu vzniká v drtivé většině případů působením lidského faktoru v přímé návaznosti na operátorovu zručnost. Nejčastěji se jedná o odlomené části koster vinou nesprávné manipulace, upnutí do svorek či pádu, případně o tepelné poškození plastových částí v důsledku vytváření pájeného spoje po neúměrně dlouhou dobu. Předcházet mechanickým poškozením je možné zejména vhodným zpřípravkovaním výroby. Díky použití vhodných upínacích prostředků se minimalizuje riziko pádu či nesprávného upnutí dílu pro provádění příslušných výrobních operací. Každý vhodně tvarovaný upínací přípravek zaručí minimální nežádoucí pohyb výrobku a přispívá tak k omezení mechanických poškození.

Dalším typem mechanického poškození je narušení izolace vinutí, ke kterému dochází buď již při samotném návinu, nebo při odstraňování zesílené izolace. Poškození izolace patrné z *obrázku 14* je způsobeno mechanickým odstraňováním zesílené izolace přístrojem Arno fuchs Abisofix.

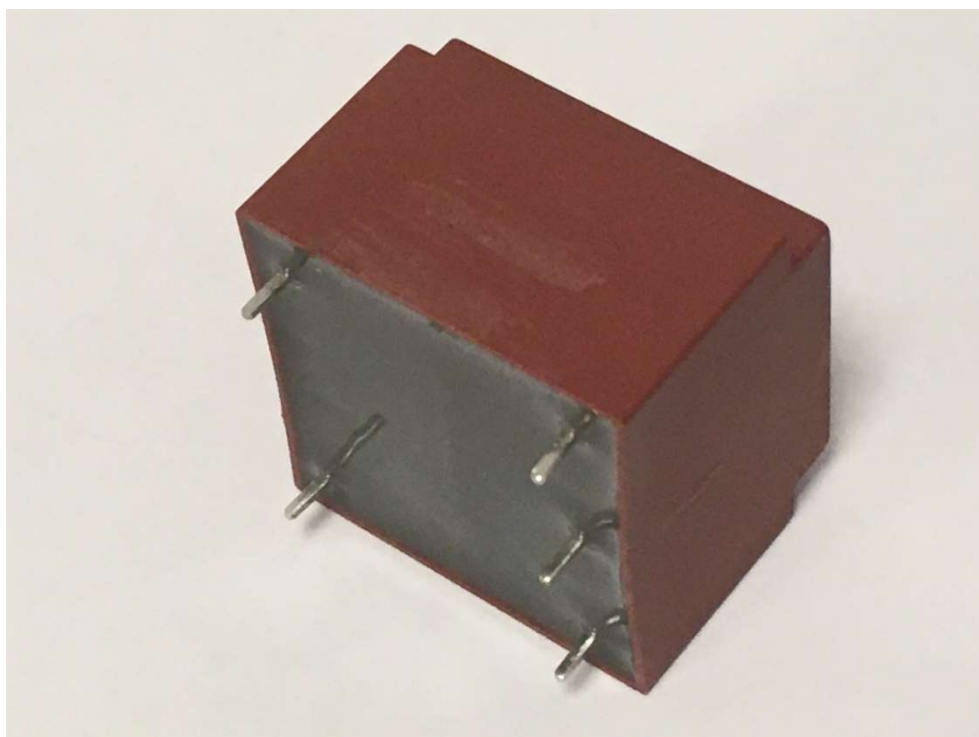


*Obr. 14 Poškozený vodič vinutí po mechanickém odizolování přístrojem Abisofix*

Výše zmiňovaná poškození jsou většinou považována za závadu potenciálně znemožňující budoucí zpracování a život produktu. Existuje však kategorie mechanických



poškození, kdy je poškození pouze estetického charakteru. Mezi takovéto vady patří například mírně poškrábaná krabička zapouzdřeného dílu po procesu čištění úkapu zalévací pryskyřice apod. Takováto poškození jsou považována za přijatelná (označují se jako tzv. indikátor odchylky), nesmějí se však v průběhu výroby znovu opakovat a je potřeba přistoupit k optimalizaci výrobního procesu. Příklad tohoto druhu poškození dílu je zachycen na *obrázku 15*.



*Obr. 15 Poškrábaná krabička jako důsledek čištění úkapu zálivky*

### 5.2.2.2 Nečitelné označení dílu

Pro označování hotových dílů příslušným typovým číslem, datem výroby, případně sériovým číslem, je používáno nejrůznějších technologií. Běžně používanými technologiemi je tamponový tisk, inkoustový tisk, laserové gravírování či označení za pomoci etiket. Nejdůležitějšími parametry označení jsou čitelnost a trvanlivost. Norma IPC-A-610 pojednává v kapitole 10.5 o kritériích přijatelnosti značení na deskách plošných spojů [40], avšak tato kritéria lze považovat za obecně platná a lze se jimi řídit i při značení cívek nebo jiných elektronických komponentů.

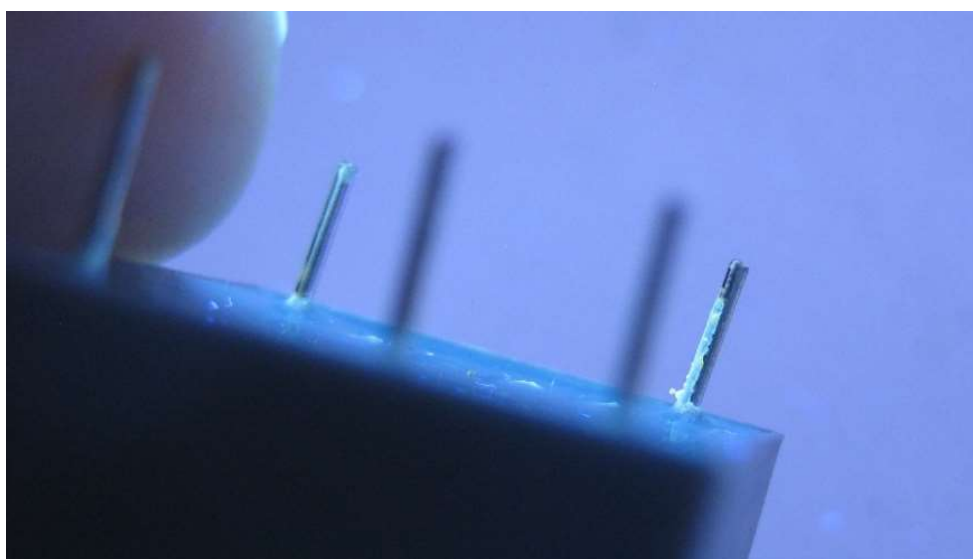
Za nejspolehlivější techniku označování lze považovat laserové gravírování. Při něm dochází k výpalu označení do materiálu cívky, nejčastěji do krabičky. Při správném nastavení popisovacího zařízení dochází k velmi čitelnému značení se stoprocentní

trvanlivostí. Nevýhodou je, že při nesprávném seřízení je díl znehodnocen. Z tohoto hlediska je vhodnější využívat označovací systémy založené na využívání tekutých pigmentů – barev. Inkoustovým či tamponovým tiskem je možno vytvářet velice čitelné a trvanlivé označení dílu, jež lze v případě nečitelnosti odstranit vhodným rozpouštědlem. Dalším příkladem je použití etiket. To je výhodné zejména z důvodu použití pouze vyhovujících etiket. Nevýhodou však může být trvanlivost takového označení. Při nedokonalém odmaštění dílu před aplikací etikety může docházet k jejímu odlepování. To může vést až k úplnému odpadnutí etikety, především v automatických myčkách desek plošných spojů.

### 5.2.2.3 Chyby zálivky a zalévacích pryskyřic

Při procesech pouzdření dílů může docházet k nejrůznějším vadám, ať již z důvodu nevhodné přípravy chemikálií, nečistot v zalévaných dílech, zpracování zalévacích hmot či jejich vytvrzování za nevhodných podmínek.

Kvůli vlhkosti přirozeně obsažené v dílech a zalévacích hmotách je samotný proces pouzdření náročnější. Při použití vývěvy k vytažení vzduchu z vnitřních prostor dílu zálivka v důsledku vlhkosti více pění. Takovéto díly bývají mnohem náchylnější na znečištění pinů zalévacími pryskyřicemi. Ty je třeba následně očistit, aby byla zajištěna dobrá pájitelnost těchto dílů. Díky UV reaktivním příměsím v zalévacích a impregnačních pryskyřicích je možné provádět kontrolu čistoty pinů pomocí UV světla. Na *obrázku 16* je viditelný zbytek zalévací pryskyřice, která díky UV světlu nazelenale luminiskuje.



Obr. 16 Zalévací hmota na pinu pod UV světlem

Velice důležitá je pro procesy pouzdření i čistota dílu. I správně homogenizovaná zalévací pryskyřice namíchaná s odpovídajícím tvrdidlem ve správném míšicím poměru může kvůli kontaminaci další chemikálií nevytvdřit, jak znázorňuje *obrázek 17*. Z těchto důvodů je potřeba kritické díly před těmito procesy umývat vhodnými prostředky, například izopropylalkoholem.

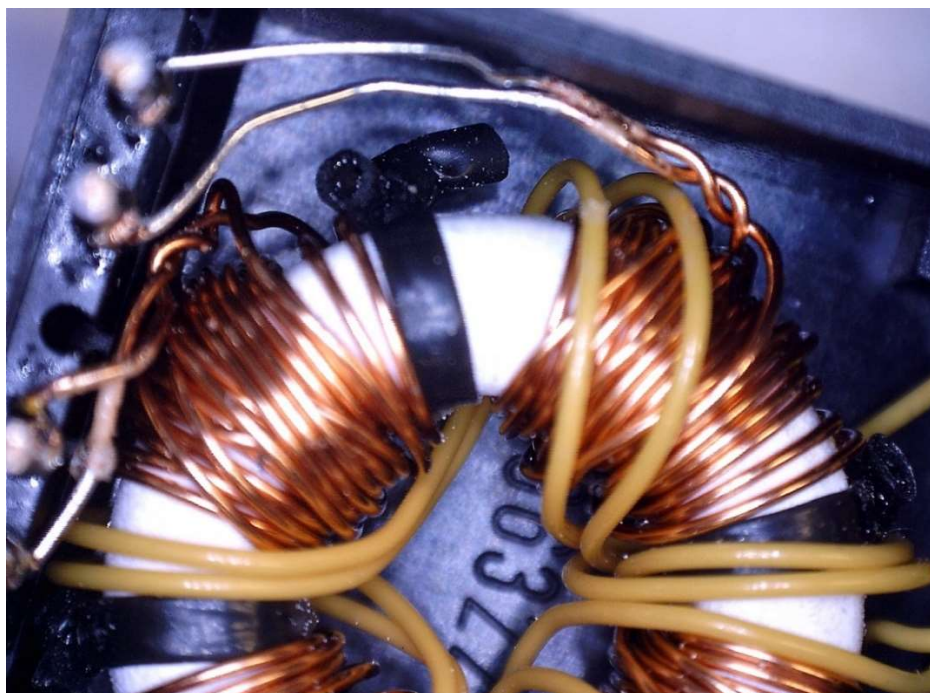


*Obr. 17 Zalévací hmota – makroskopické nehomogenity*

Vhodným vylepšením procesu pouzdření je zapojení zalévacích automatů, které dokáží díl zalévat za sníženého atmosférického tlaku. Takový zalévací automat si zpravidla sám míchá odpovídající množství zálivky v předepsaném podtlaku a rovnou jej zpracovává. V mezizávitových prostorech dílu tedy nevznikají vzduchové kapsy, které by bylo třeba následně vývěvou odsávat, ale rovnou se zaplňují zalévací pryskyřicí. Následkem toho zálivka tolik nepění a neulpívá na pinech, které poté není třeba čistit. Dalším přínosem je časová úspora, kdy se obsluha může věnovat přípravě dalších dílů, nikoliv ručně dávkovat zalévací pryskyřici do dílů. Výše popsané automatické zařízení je s úspěchem dlouhodobě používáno ve firmě Trafowerk Creuzburg, patřící do rodiny firem Pikatron.

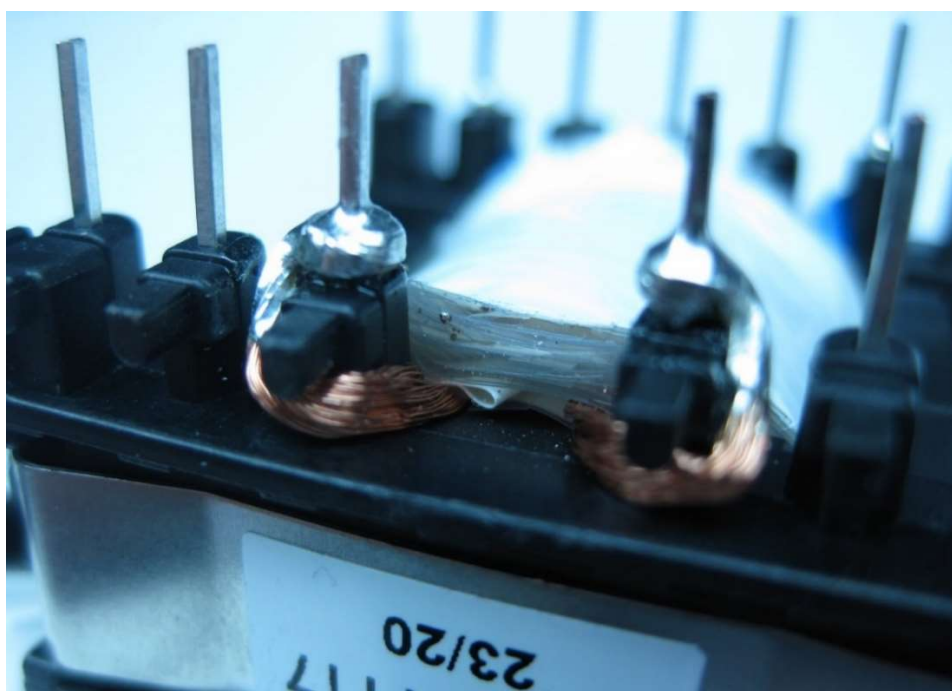
#### **5.2.2.4 Čistota**

Čistota dílů je klíčová pro většinu výrobních procesů i samotné vlastnosti vyráběných produktů. Z dat získaných ve firmě Pikatron CZ s. r. o. je zřejmé, že největší znečištění vzniká během procesu pájení. Během těchto procesů vznikají rozstříky, které ulpívají na dílech. Názorným příkladem je *obrázek 18*, zachycující toroidní cívku, jež by měla být zapouzdřena.



Obr. 18 Rozstřík pájky na cívce před zálivkou – cínové perly

Na obrázku 19 jsou taktéž patrné rozstříky pájky nachytné mezi závitů mezivrstevové izolace dílu. Takovéto znečištění se jen velmi obtížně odstraňuje. Z toho vyplývá, že nejlepší metodou zachování čistoty dílů je prevence. Za použití vhodných cínovacích přípravků a zábran je možné těmto rozstříkům ve velké míře předcházet a vyhnout se tak časově velmi nákladnému čištění dílů.



Obr. 19 Rozstřík pájky ve vrstvách mezivrstevové izolace – cínové perly

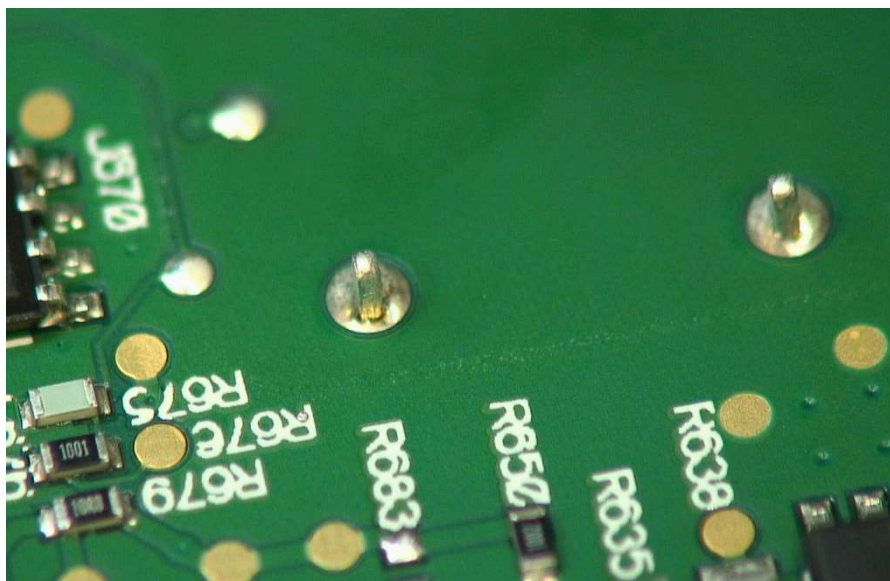
Důkladné odstranění rozstříků pájky je důležité především z hlediska možného narušení minimálních izolačních vzdáleností kdekoliv v pájené sestavě. Nezafixovaná kulička pájky se může v průběhu života výrobku uvolnit do provozního prostředí a v nejhorším možném případě hrozí riziko vyzkratování vývodů některého z komponentů pájené sestavy, a tím i poškození funkčnosti celého koncového výrobku. Z toho důvodu jsou nezafixované rozstříky pájky normou IPC-A-610 považovány za závadový stav [40]. Oproti tomu kuličky pájky, neporušující minimální izolační vzdálenosti, fixované impregnačním lakem či jinak znehybněné, jsou normou IPC-A-610 považovány za stav přijatelný [40].

Dalším častým zdrojem znečištění jsou tavidla. Existují sice bezoplachová tavidla [29], ale i jejich přítomnost může znamenat riziko pro následné výrobní procesy, zejména pouzdření dílů. Během vytvrzování zalévacích pryskyřic za zvýšených teplot může dojít v důsledku přítomnosti tavidla ke vzniku makroskopických nehomogenit, které zachycuje *obrázek 17*. Tavidla bývají rozpustitelná izopropylalkoholem, za jehož pomoci jsou z dílu smývána.

Dalším kritickým místem z hlediska čistoty jsou piny. Na nich nesmí zůstat žádná nepájivá vrstva tvořená impregnační či zalévací pryskyřicí. Takto znečištěné piny je třeba vhodným způsobem zbavit zbytků pryskyřic, jinak jsou díly prakticky neosaditelné do desky plošného spoje. Při nesprávném způsobu očištění, například za použití nože, jak je zachyceno na *obrázku 20*, může dojít k narušení pokovení pinu a jeho následné nepájivosti. To může mít za následek až zákaznickou reklamaci, jak je zdokumentováno na *obrázku 21*.



Obr. 20 Zákaznická reklamáce – Poškozená cínová vrstva pinu



Obr. 21 Zákaznická reklamáce – Nesmáčený pájecí bod

### 5.2.3 Nepředepsané elektrické rozměry

Z teoretického úvodu v kapitole 1 jasně vyplývá závislost elektrických vlastností na mechanických rozměrech a geometrickém uspořádání materiálů, ze kterých je cívka vyrobena. Nevyhovující elektrické vlastnosti jsou tedy z valné většiny až důsledkem nedodržení mechanických parametrů.

#### 5.2.3.1 Nesprávná hodnota vlastní indukčnosti

Nejrozšířenější elektrickou závadou je nesprávná velikost vlastní indukčnosti. Odchylna od předepsané hodnoty může být způsobena vícero faktory. Zcela ojediněle je její příčinou použití nesprávného typu jádra či jádra s nevyhovujícími parametry.

Nejčastější příčinou chybné indukčnosti jsou nečistoty mezi styčnými plochami jader pro lineární cívky. Při nedostatečné čistotě styčných ploch vyvíjejí operátoři, ve snaze dosáhnout požadované indukčnosti, na lepený spoj během lepení jader větší tlak, než je nutné. Tím hrozí i riziko prasknutí samotného jádra. S čistotou souvisí i používání přiměřeného množství lepidla mezi lepená jádra. Při použití příliš velkého množství lepidla dochází k vytvrzení příliš silné vrstvy lepidla mezi styčnými plochami jádra a tím pádem ke snížení vlastní indukčnosti  $L$ . U takto slepených jader se o tloušťku lepeného spoje zvětší i vzduchová mezera středového sloupku. Případně vznikne a tím  $L$  dále klesá. Vhodným opatřením je jádra před osazováním do cívek omývat a odmašťovat, což se praktikuje primárně z důvodu zvětšení pevnosti lepeného spoje.

Čistota styčných ploch není jen výsadou lepených feritových jader. Zásadní vliv na hodnotu  $L$  má čistota u všech typů jader. Včetně nelepených konstrukcí se třmeny. Vliv nečistot na vlastní indukčnost je zachycen na *obrázcích 22 až 24*.



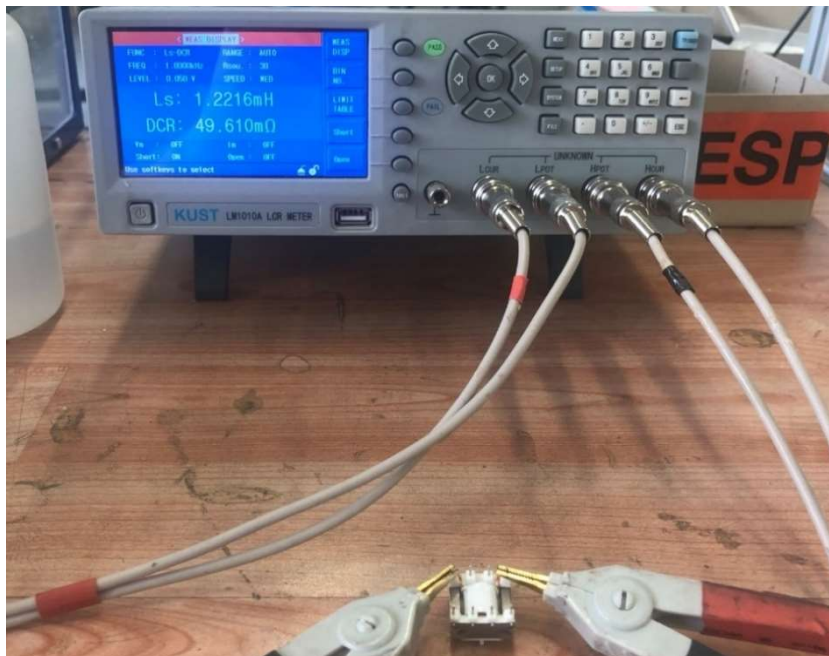
Obr. 22 Závěrečná bandáž mezi feritovými jádry

Na *obrázku 22* je patrný růžek polyetylenové (PE) pásky Tesa, ze které je zhotovena závěrečná bandáž vinutí. Tento růžek se během montáže jader odlepil od cívky a byl přivřen mezi poloviny jader. I malý kousek izolační pásky, který se tlakem třmenu rozprostře po větší ploše, má na vlastní indukčnost markantní vliv. Jak je zachyceno na *obrázku 23*, hodnota vlastní indukčnosti je přibližně rovna 258,5  $\mu\text{H}$ .



Obr. 23 Izolace mezi feritovými jádry – Elektrické vlastnosti před opravou

Tentýž díl po vyčištění styčných ploch a opětovném složení vykazuje diametrálně odlišnou hodnotu vlastní indukčnosti. Jak je vidno na *obrázku 24*, hodnota vlastní indukčnosti se vyčištěním styčných ploch takřka zpětinásobila; hodnota  $L$  činí u tohoto dílu po opravě přibližně 1,22 mH.



Obr. 24 Izolace mezi feritovými jádry – Elektrické vlastnosti po opravě

K odchylce  $L$  směrem k vyšším hodnotám dochází jen velmi zřídka. Pokud k nim dochází, bývá to povětšinou z důvodu nepřesností  $A_L$  jádra, větším počtem závitů či nesprávnou velikostí vzduchové mezery.

### 5.2.3.2 Odpor $R$

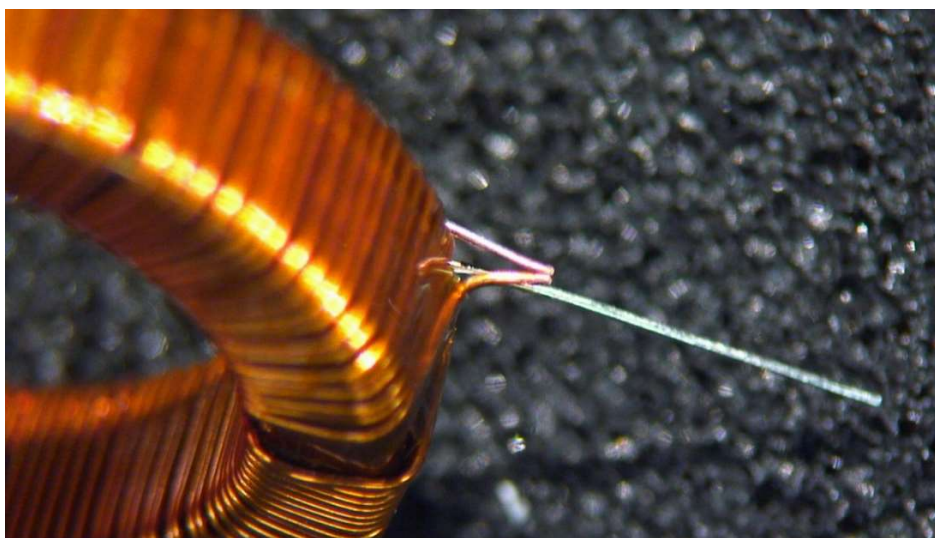
Veškeré uváděné příklady neodpovídající hodnoty  $R$  předpokládají předepsanou teplotu dílu při měření a optimální napívací tah drátu během navíjení.

Za splnění obou těchto předpokladů má největší vliv na  $R$  kvalita provedení pájeného spoje. Měření totiž zřídka probíhá přímo mezi vývody vinutí. Mnohem častěji se měří  $R$  mezi piny, ke kterým jsou vývody připájeny. Důležité pro kvalitní vytvoření pájeného spoje jsou čistoty obou pájených povrchů ve smyslu absence povrchových oxidů na pinech a vývodech vinutí. K lepšímu vytváření pájených spojů je vhodné používat příslušná tavidla, díky kterým dochází v důsledku odstranění povrchových oxidů k lepšímu smáčení pájených povrchů a tím ke kvalitnějšímu propojení obou povrchů cínovou pájkou.



Při výrobě mohou nastat i situace, kdy ani za použití tavidel nedochází k vytvoření kvalitního pájeného spoje. Často se tak děje u vodičů se zesílenou izolací, kde se nepodařilo izolaci dokonale mechanicky odstranit. Totéž platí pro lankové vodiče a lankové vodiče s opletem, u kterých se tavidla nepoužívají vůbec z důvodu jejich vzlínivosti do vodiče a následnému nemožnému vymytí.

U vodičů se zesílenou izolací, kde třeba pomocí odizolovacích nástrojů odstraňovat izolační vrstvu, jsou tyto metody velice závislé na nastavení odizolovacího přístroje. Snadno může nastat situace, při níž buďto nedojde k odstranění veškeré izolace a část povrchu vodiče bude stále nepájivá, nebo naopak dojde k úbytku mědi z materiálu vodiče. Takto poškozený vodič začne vykazovat vyšší  $R$  a zhorší se jeho mechanické vlastnosti. Na *obrázku 25* je zachycen vývod vinutí, u kterého byla odstraněna izolace nesprávně nastaveným rotačním odizolovacím přístrojem Arno fuchs Abisofix i s částí mědi. V důsledku toho došlo k tak velkému zeslabení vodiče, až nastalo jeho odlomení.



*Obr. 25 Odlomený vodič jako důsledek nesprávného mechanického odizolování*

Vodič je v tomto konkrétním případě nominálního průměru 0,404 mm, avšak v jeho nejzúženější části dosahoval průměr po pocínování sotva poloviny tohoto průměru, jak je vidno z *obrázku 26*. V takových případech je nutno zvolit šetrnější způsob odstranění izolace, který by neubíral materiál vodiče, například vyhřívanou odizolovací pinzetu.

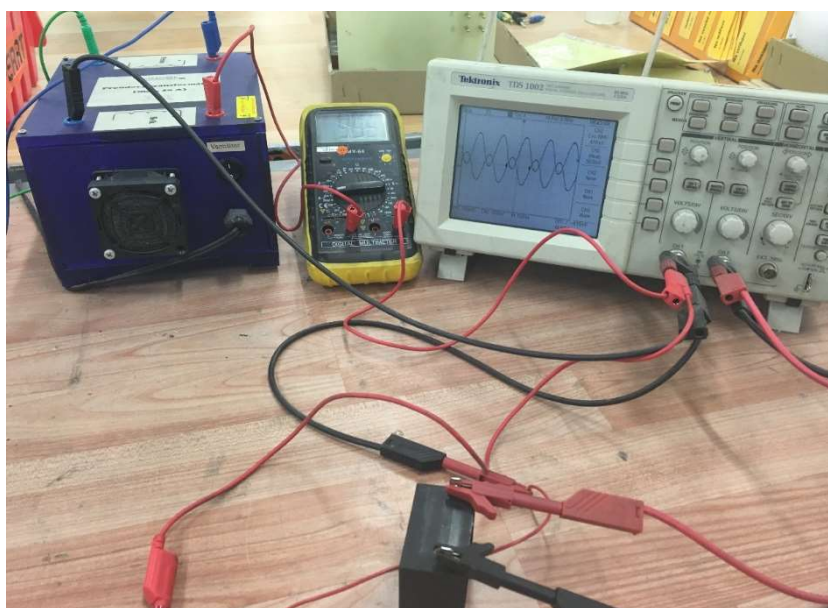


*Obr. 26 Poškozený vodič po mechanickém odizolování*

U lankových vodičů je velmi důležité důkladné procínování všech žil vodiče. Ideální je provádět jej ponorem v cínovací lázni a až poté provádět ovin pinu. V ponorné cínovací lázni dochází k lepšímu prohřátí vodičů, spálení jejich izolace a jejímu následnému odplavení. Pouhý ovin pinu neocínovaným lankovým vodičem a následný pokus o vytvoření pájeného spoje za použití hrotové páječky je u takového vodiče předurčen k vysokému  $R$  právě z důvodu neprocínování všech jednotlivých žil. Ty se pak nemohou podílet na přenosu proudu. Stejný vliv má i přerušení některých žil vodiče během náviny. Toto přerušení vede k nárůstu  $R$  dle závislosti ve vztahu (4) kvůli skokově klesajícímu průřezu vodiče.

### 5.2.3.3 Fázový posun

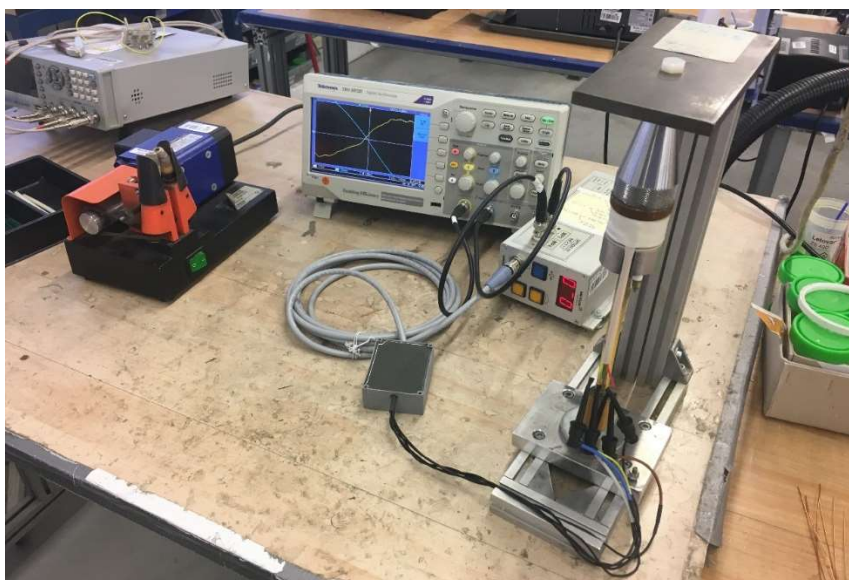
Při kontrole fázového posunu lze pomocí osciloskopu rychle odhalit díl, u kterého byly vývody vinutí při vyvádění k pinům prohozeny. Kvůli tomu je takové vinutí vůči testovacímu závitě na cívce opačně orientováno. Testovací závit je prostrčen skrz otvor toroidní cívky či dutinou v kostře lineární cívky před montáží jádra. Z displeje osciloskopu je pak zřetelné, zda se začátek vinutí nachází na správném pinu, jak ukazuje *obrázek 27*.



Obr. 27 Měření fázového posunu za pomoci osciloskopu

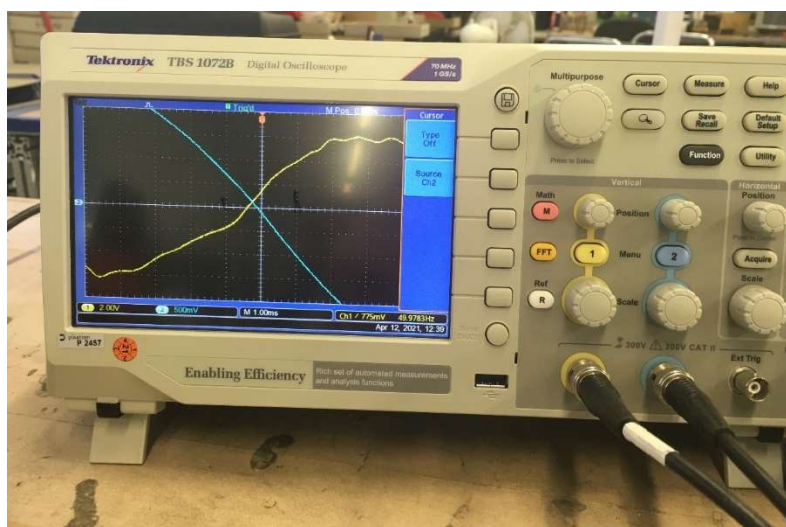
Na fotografii je zachycen díl, u kterého byly vývody při montáži na piny prohozeny. Indukované napětí na cívce je tím pádem vůči budicímu napětí v protifázi. Konkrétně u tohoto dílu, kde jsou cínovací body zapouzdřeny zalévací pryskyřicí, by neodhalení při mezioperační zkoušce znamenalo vadný díl určený k likvidaci. Díky včasné kontrole je možno díl přepracovat a ušetřit tak čas i materiál na výrobu nového dílu.

V jiných případech je důležité znát přesný fázový posun, který na cívce vzniká. Tato znalost je zásadní v případech, kdy cívky slouží jako čidla a odezva na změnu signálu je jejich nejdůležitějším parametrem. Měří se taktéž pomocí osciloskopu a speciálních budících obvodů, které simulují reálný provoz nebo vysílají testovací signál, na jehož základě je možné posoudit vlastnosti cívky. Průběh takového měření je zaznamenán na *obrázku 28* a *obrázku 29*.



Obr. 28 Měření odezvy na budící signál – celkový pohled

Při odhalení nevyhovující odezvy je díl vyřazen z výrobního procesu a na základě analýzy provedení jeho návinu je přistupeno k seřízení navijecího stroje. Největší vliv na odezvu signálu má v tomto konkrétním případě rozložení návinu v navijecích komorách dílu. Zde je silně patrný přínos metody One piece flow, díky které je možno navijecí stroj po každém navinutém dílu, v případě potřeby, doseřít.



Obr. 29 Měření odezvy na budící signál – výsledky na osciloskopu

#### 5.2.3.4 Vysokonapěťová kontrola

Dalším typem kontroly, která je v praxi využívána velice často, jsou vysokonapěťové testy, které mají za úkol odhalit nedostatky v izolaci jednotlivých vinutí. Proces odhalení nedokonalosti izolací či nedodržení minimálních izolačních vzdáleností mezi různými potenciály je destruktivního charakteru. Během těchto testů je na vývody vinutí přiveden potenciál a je tak zkoumáno, zda během předem stanoveného časového úseku nedojde k průrazu izolací či k přeskoku mezi jednotlivými vývody. Na *obrázku 30* je zdokumentován díl, který byl vyřazen během optické kontroly před vysokonapěťovým testem z důvodu nedodržení minimálních izolačních vzdáleností.



Obr. 30 Porušená minimální izolační vzdálenost mezi vývody v oblasti kostry

Pokud dojde k průrazu uvnitř cívky, přistupuje se k jejímu rozebrání a analýze důvodu vzniku průrazu. Následně jsou učiněna preventivní opatření během výroby či doplnění dalších typů izolace. Jedním ze způsobů zlepšení výsledků vysokonapěťových testů je zařadit do výrobního procesu vakuovou impregnaci dílu, která při správném provedení dokáže izolační pevnosti uspokojivě zvýšit.

#### 5.2.3.5 Kontrola částečných výbojů

Kontrola výskytu částečných výbojů patří mezi moderní způsoby diagnostiky dílů i správnosti nastavení výrobních procesů, za jejichž pomoci byly díly zhotoveny. Tímto způsobem diagnostiky je možno odhalovat mikroskopické narušení izolací, nehomogenity zalévacích hmot, delaminace apod. Je využíváno nejčastěji různých automatických měřičů částečných výbojů jako je například přístroj PARTIAL DISCHARGE METER TMG

doplňený příslušným softwarem od německé firmy MPS Mess-& Prüfsysteme GmbH, využívaný firmou Pikatron CZ s. r. o., zachycený na *obrázku 31*. Díky odhalování částečných výbojů lze vhodným způsobem upravovat výrobní procesy, na základě čehož lze odstraňovat příčiny jejich vzniku a tím napomáhat jejich eliminaci a nepřímo tím i prodlužovat životnost koncových zařízení.

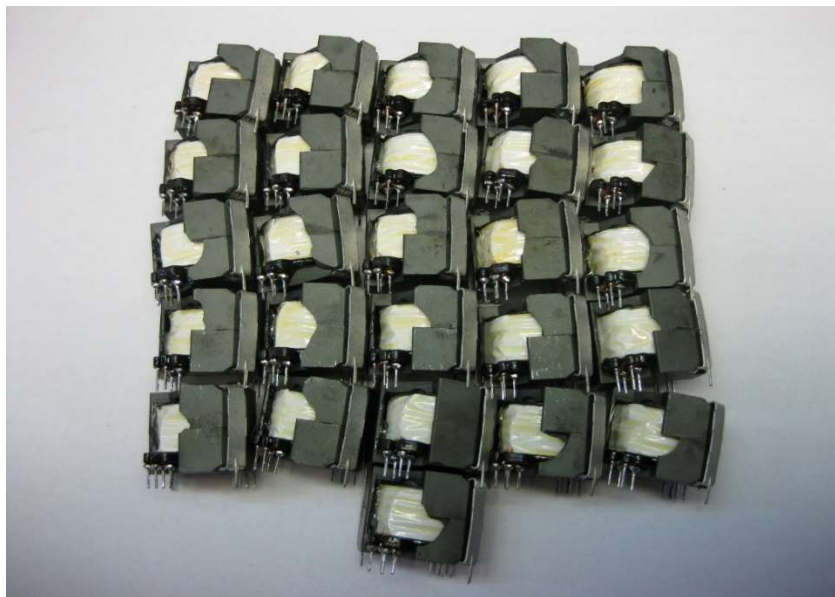


Obr. 31 Automatický měřič částečných výbojů MPS TMG

Vyjma mechanických nedostatků je právě nevyhovující výsledek této kontroly mandatorním důvodem interních reklamací elektrických parametrů v rámci rodiny firem Pikatron v časovém období od července roku 2020 do února 2021, které ukazuje *tabulka 1*.

### 5.3 Balení

Stejný důraz jako na kontroly v průběhu výroby je kladen na správné zabalení dílů pro potřeby expedice k zákazníkům. Důležitost korektního zabalení je znázorněna na *obrázcích 32 a 33*, kde jsou zdokumentovány možné následky nesprávného způsobu zabalení hotových cívek. Ten je velmi závislý na velikosti hotové cívky, nicméně volbou vhodného obalového materiálu lze minimalizovat riziko poškození cívek během přepravy na naprosté minimum. U menších dílů, především u SMD komponent, je vhodné využívat balení typu Tape and reel, kde jsou díly baleny do pásů. Větší komponenty je vhodné umisťovat do vhodně tvarovaných balících blistrů.



Obr. 32 Poškození při přepravě z důvodu nekorektního zabalení výrobku



Obr. 33 Ohnuté piny nevhodným zabalením

#### 5.4 Tabulka rychlých řešení

Vzhledem k opakujícímu se výskytu stejných či velice obdobných chyb je vhodné umět rychle odhadnout příčinu vzniku konkrétní chyby a následně navrhnout vhodné řešení, vedoucí k jejímu odstranění. Na základě dlouhodobého pozorování a sběru informací z výroby ve firmě Pikatron CZ s. r. o., kde autor této práce zastává vedoucí pozici a má tedy přehled o popisované problematice získaný přímo výrobní praxí, byla autorem práce navržena *tabulka 2*. V ní je uveden přehled častých závad zachycených při uvolňování nových sérií dílů autorem této práce. Součástí jsou i jejich možné příčiny a řešení.

Tabulka 2: Přehled častých závad, jejich možných příčin a řešení

Závada	Možná příčina	Řešení
Není zajištěna průchodnost proudu	Vývod vyveden ke špatnému pinu	Zkontrolovat vyvedení vinutí ke správným pinům a poučit operátora
	Není vytvořeno vodivé spojení pinu a vývodu vinutí nebo není vývod dostatečně odizolován	Odizolovat vývod vinutí Procínovat pin s vývodem vinutí
	Přetržené vinutí	Závada je neopravitelná; díl vyřadit a znovu nastavit proces navíjení
Nesprávný počet závitů či neodpovídající poměr závitů mezi vinutími	Nesprávný počet závitů jednoho či všech vinutí	Zkontrolovat nastavení navíjecího stroje; v případě ručního návinnu poučit operátora
	Otočený smysl jednoho z vinutí	Zkontrolovat vyvedení vinutí ke správným pinům Ověřit smysl otáčení navíjecího stroje
Nízká indukčnost $L$	Nevhodné zvolené parametry měření	Zkontrolovat nastavení parametrů měření, především předepsanou měřicí frekvenci
	Nesprávný počet závitů	Zkontrolovat nastavení navíjecího stroje
	Použití neodpovídajícího typu jádra	Zkontrolovat použití předepsaných jader a velikost vzduchové mezery
	Používáno příliš mnoho lepidla při lepení jader, nebo je malý upínací tlak při lepení	Projít s operátorem proces lepení a znovu jej operátorovi vysvětlit
Vysoká indukčnost $L$	Nevhodné zvolené parametry měření	Zkontrolovat nastavení parametrů měření, především předepsanou měřicí frekvenci
	Nesprávný počet závitů	Zkontrolovat nastavení navíjecího stroje
	Použití neodpovídajícího typu jádra	Zkontrolovat použití předepsaných jader a velikost vzduchové mezery
Vysoký odpor $R$	Nesprávný počet závitů	Zkontrolovat nastavení navíjecího stroje
	Nevynulovaný měřicí přístroj	Vykompenzovat měřicí sondy měřícího přístroje
	Použití měřících sond / měřícího adaptéru odpovídající konstrukce	Vyměnit měřicí sondy za odpovídající. Dbát na čtyřvodičové zapojení
	Příliš velká brzdná síla odvíječe drátu	Zkontrolovat nastavení navíjecího stroje
	Nesprávná teplota dílu	Vytemperovat díl na 20 °C
	Nedokonalý pájený spoje mezi pinem a vývodem vinutí	Zkontrolovat proces pájení U lankového vodiče je důležité procínovat všechny žily vodiče
	Použití vodiče nesprávného průměru	Ověřit použití správného vodiče

Nízký odpor $R$	Použití vodiče nesprávného průměru	Ověřit použití správného vodiče
	Nesprávná teplota dílu	Vytemperovat díl na 20 °C
	Nesprávný počet závitů	Zkontrolovat nastavení navijecího stroje
	Nevynulovaný měřicí přístroj	Vykompenzovat měřicí sondy měřicího přístroje
Nesprávná hodnota impedance $Z$	Nevhodné zvolené parametry měření	Zkontrolovat nastavení parametrů měření, především předepsanou měřicí frekvenci
	Nepředepsaná hodnota $R$ nebo $L$	Zkontrolovat odpor vinutí a vlastní indukčnost; nevyhovující parametr zkorigovat dle příslušné závady, viz řešení problémů s $R$ a $L$
Vysoká unikající indukčnost $L_S$ (z něm. Streuinduktivität)	Nezkratované sekundární vinutí transformátoru během měření	Ověřit zkratování vinutí a případně prozkratovat všechny vývody krom vývodů měřeného vinutí
	Špatné rozložení návinu na magnetickém obvodu	Optimalizovat proces navíjení
Nepředepsaná hodnota kapacity $C$ mezi vinutími nebo stínícími plechy	Špatný napínací tah při návinu vinutí	Zkorigovat napínací tah vodiče
	Špatný napínací tah při návinu bandáží a izolací	Optimalizovat proces navíjení bandáží; při ručním napínání bandážovacích pásek poučit operátora o přiměřenosti tahu
	Nepředepsaný počet vrstev izolace	Zkontrolovat nastavení navijecího stroje; při ručním bandážování poučit operátora o správném počtu izolačních vrstev
	Špatné rozložení návinu	Optimalizovat proces navíjení
	Absence stínícího plechu	Ověřit, že nebyla přeskočena výrobní operace
Průraz izolace během vysokonapěťového testu	Poškozená základní izolace vodiče	Zkontrolovat, zda se vodič při návinu cívky někde neodírá. Mezi špulí s vodičem, odvíječem drátu, naváděčem drátu a samotnou navíjenou cívkou nesmí docházet k jeho oděru
		Navrhnout použití vodiče se zesílenou izolací či doplňkové izolace
	Měření příliš vysokým napětím	Nastavit předepsané měřicí napětí
Vznik částečných výbojů	Nečistota v dílech či mikroskopické nehomogenity v zalévací pryskyřici	Díly důkladněji omývat před procesem zapouzdření
		Zbavit díly i zalévací pryskyřici vlhkosti před zapouzdřením
	Nevyzrálá zálivka	Zálivku lépe homogenizovat, ideálně za sníženého atmosférického tlaku Provádět měření po dokonalém vytvrzení zálivky



## 5.5 Doporučená opatření proti vzniku výrobních vad

Hlavním cílem předložené bakalářské práce bylo identifikovat příčiny vzniku výrobních vad a navrhnout jejich možná řešení, která by systémovým způsobem předcházela jejich vzniku. V rámci hledání těchto příčin byly analýze podrobeny záznamy o interních a zákaznických reklamacích v rodině firem Pikatron.

Při analýze poskytnutých podkladů bylo zjištěno, že nejméně spolehlivou částí výrobního řetězce je samotný operátor, který i přes dobře nastavený výrobní cyklus neustále opakuje prakticky totožné chyby. Příčinou těchto nejčastěji nahodilých chyb bývá ve většině případů neschopnost operátora udržet maximální možné soustředění na odváděnou práci a samozřejmě také jeho únava. Proto je vhodné samotnou výrobu operátorům usnadňovat v co největší možné míře zejména vhodným zpřípravkovaním a částečnou automatizací dílčích výrobních procesů. Vhodně zvolený stupeň automatizace odstraní z výrobního procesu značnou část vlivu lidského faktoru a tím pádem i závad vzniklých v jeho důsledku. Při nevhodně zvoleném stupni automatizace či v důsledku jejího nedokonalého nastavení se však ve výrobním procesu začnou postupně vyskytovat chyby multiplikativní (jejichž výskyt následně lineárně narůstá). Při jejich pozdním odhalení je následně nutno vynaložit nemalé finanční a časové prostředky pro odstraňování jejich možných následků.

Výrobním chybám se bohužel ve výrobě nedá stoprocentně zamezit, proto je snahou výrobních podniků učinit tyto chyby co nejpředvídatelnějšími a snadno a rychle odstranitelnými. Čemuž zavádění průmyslových automatizovaných strojů značně napomáhá. Při jejich správné konfiguraci a začlenění do výrobního procesu operátorům ubude část výrobních činností a mohou se více věnovat kontrolním operacím.

Plně automatizovaná výroba je velmi finančně nákladná. To zapříčiňuje ve výrobních podnicích znatelnou nedostupnost těchto moderních technologií. Bohužel se zatím nedaří zavádět ani částečná automatizace a velká část výroby se stále provádí ručně. To není z hlediska kvalitativního standardu ani zdaleka stavem žádaným. Zvyšování kvalitativního standardu je z tohoto důvodu stále velmi obtížné a vyžaduje neustálou aktivní práci všech článků výrobního řetězce.

Díky pozvolnému zlevňování tohoto druhu technologií se však dostupnost automatizované výroby pro výrobní firmy postupně zlepšuje. To přináší do firem velký potenciál ve formě mnohem větší systematizace nastavení výrobních procesů a tím i docílení plynulého a stálého zvyšování kvalitativního standardu vyráběných dílů. Příliš rychlá či razantní změna výrobního procesu, jakožto i možná fluktuace zaměstnanců, se navzdory modernizaci vyznačuje krátkodobým poklesem kvalitativní úrovně. Tu je díky tomuto pozvolnému nástupu modernějších technologií a neustálému zvyšování kvalifikace pracovníků mnohem snazší zachovat na dostatečné hladině.

Kromě zvyšování kvalifikace operátorů a zavádění moderních automatizovaných technologií je možné výrobu systematizovat výrobními přípravky. Ty mají při vhodném návrhu přímý vliv na omezení vlivu lidského faktoru a chyb vznikajících v jeho důsledku. Jejich dalším důležitým přínosem je snížení časové náročnosti výroby a tím zefektivnění celého výrobního procesu. Benefitem tohoto řešení je i přiměřená cena přípravků, díky čemuž je toto řešení velice dostupné.

## Závěr

Díky znalosti konstrukce cívek a elektrických veličin, se kterými je možno se setkat ve výrobě cívek, může být získána představa o možnostech jejich výroby. V návaznosti na to je možné odhalit vlivy ovlivňující dosažitelnou kvalitu. Jejich odhalení je pro odstraňování vzniku příčin nepředepsaných elektrických vlastností vyráběných dílů velice důležité. Většina elektrických veličin popsaných v první kapitole je úzce svázána s geometrickým uspořádáním materiálů, ze kterých je cívka vytvořena. Z toho pramení předpoklad, že prvotním důvodem odchylek od předepsaných elektrických vlastností je nedodržení mechanických parametrů.

Doplnění celkového obrazu o výrobě je možno docílit seznámením se se základními materiály používanými ve výrobě a s jejich vlastnostmi. Z této znalosti je možné dále vycházet při určování vhodných materiálů pro použití u konkrétního produktu. Tato práce neuvádí veškeré materiály používané při výrobě cívek, neboť je jejich škála příliš široká a pro potřeby této práce irelevantní. Uvedené příklady materiálů však umožňují alespoň základní představu o tom, z jakých materiálů se cívky mohou skládat a z jakých důvodů jsou používány právě tyto materiály a komponenty pro výrobu cívek.

Metody výroby dvou základních druhů cívek, lineárních a toroidních, o kterých pojednává třetí kapitola předložené práce, představují úskalí výrobních procesů. Součástí popisu výroby jsou i způsoby provádění návinů těchto druhů cívek za pomoci strojních navíječek. Pochopení správné funkce těchto navíjecích strojů otevírá možnost změnou jejich parametrů přímo ovlivňovat vlastnosti a kvalitu zhotovovaného výrobku. Uváděné parametry, které je třeba během návinu sledovat, mají na výsledné elektrické i mechanické vlastnosti značný vliv. Jejich včasná korekce dostatečně předchází systémovým multiplikativním chybám a zabezpečuje kvalitní výrobu.

Na výslednou kvalitu má, mimo jiné, značný vliv též způsob nakládání s materiály a komponenty určenými pro výrobu cívek. Především způsoby skladování jednotlivých druhů materiálu. Zejména zamezení působení okolních podmínek má vliv na zpomalování přirozené degradace těchto materiálů. Kromě vlivu skladování působí na výslednou kvalitu produktu taktéž zpracování těchto materiálů. Nastavením výrobního procesu je možno přímo ovlivňovat výsledné vlastnosti a kvalitu vyráběných cívek.

Způsob měření vlastností, kterými jednotlivé díly procházejí, je v reálném provozu sériové produkce cívek značně zjednodušen. Větší důraz klade předkládaná práce na důvody samotných měření elektrických parametrů než na jejich konkrétní způsoby. Ke zjednodušování a automatizaci měření se výrobci uchylují převážně z důvodu nekvalifikovanosti obsluhy. Díky tomu je měření pro obsluhu co možná nejjednodušší a zároveň velmi rychlé, objektivní a zpětně kontrolovatelné za pomoci protokolů z měřících automatů.

S kvalifikovaností operátorů souvisí i snaha výrobních firem nastavit výrobu co nejjednodušeji. Snaží se ji náležitě vybavit pomůckami tak, aby nejen výrobu, ale i měření mechanických parametrů bylo možné provádět bez použití cejchovaných měřidel. Ta mají ve výrobě stále velmi důležitou roli, avšak použití vhodně tvarovaných přípravků a pomůcek výrobní proces značně zrychluje. Nutno podotknout, že všechny mechanické parametry a stavy výrobků jsou normalizovány a je vhodné tyto normy během výroby dodržovat. Práce uvádí příklady norem používaných pro jednotlivé části výrobních procesů, především dokument IPC-A-610. Ten pojednává o přijatelných stavech pájených sestav a o provedení jednotlivých komponentů. Díky jeho intuitivní obrázkové formě je při výrobě neocenitelnou pomůckou pro udržování kvalitativního standardu.

Data z reálného provozu ve firmě Pikatron CZ s. r. o. a obrázkové přílohy pořízené právě v této firmě ucelují konkrétní představu o možných chybách ve výrobě. Identifikováním jednotlivých druhů chyb je možno přistoupit k jejich efektivnímu předcházení vhodným způsobem. Multiplikativní chyby jsou, co se týče kontrol, poměrně snadné. Díky tomu je rychlá i následná optimalizace výrobního procesu, vedoucího k odstranění příčin vzniku těchto chyb. U nahodilých chyb je situace opačná. Ty jsou často způsobené vlivem lidského faktoru. Ten lze předvídat pouze částečně. Především na základě analýzy objevených chyb je pak možné popsat důvody jejich vzniku. Následná opatření zajišťující další neopakování těchto závad bývají zaváděna až v důsledku objevení takovéto chyby. Prevence je v těchto případech totiž nejúčinnější a nejefektivnější metodou udržení rentability výrobních procesů.

Důležitou součástí páté kapitoly je přehled často se vyskytujících chyb a návrhy vhodných kontrol vedoucích k nalezení příčiny chyby a následného řešení v *tabulce 2*. Ta byla sestavena autorem práce na základě osobních zkušeností ve firmě Pikatron CZ s. r. o.

Tento přehled je možno v reálném výrobním procesu použít jakožto pomůcku pro prevenci systémových chyb a hledání příčin chyb nahodilých.

Taktéž je možno jej použít jako část obecného kvalitativního školení operátorů. Základ takového školení by mohly tvořit především kapitoly 3 a 5. Díky informacím v nich obsaženým by školení operátoři mohli snáze pochopit důvody vyžadování některých výrobních metod, především pak metody One piece flow, která je od nich striktně vyžadována. K pochopení by mohlo dojít především díky možnosti ucelení informací o výrobě a možných důsledcích nedodržování vyžadovaných výrobních metod. Výstupem z takového školení by díky znalosti *tabulky 2* mohlo být zvýšení autonomie operátorů (ve smyslu schopnosti řešit některé jednoduše odstranitelné příčiny kvalitativních nedostatků v rámci jejich kompetencí). Což by vedoucím pracovníkům mohlo dopomoci k lepšímu time managementu a řešení komplexnějších důvodů vzniku kvalitativních nedostatků.

Z dat získaných ve firmě Pikatron CZ s. r. o. je dále zřejmé, že mandatorní podíl kvalitativních nedostatků je mechanického charakteru. Jejich vznik je nejčastěji možno přisoudit chybám samotných operátorů výroby. Především se jedná o čistotu dílů, kde byly při kvalitativních kontrolách odhaleny nedostatečně očištěné rozstříky cínové pájky. Ty jsou z hlediska provozu následné elektrotechnické sestavy zásadním problémem. Při uvolnění rozstříku pájky může dojít k porušení minimálních izolačních vzdáleností či vyzkratování obvodů a poškození celého koncového zařízení. A v konečném důsledku například k pádu letadla a ke ztrátám mnoha lidských životů. Proto je vhodné procesy cínování obohatit o vhodné cínovací pomůcky a zábrany, které budou bránit usazování rozstříků pájky na dílech, jež nebude třeba následně zdlouhavě čistit.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-49-X.
- [2] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0.
- [3] POKORNÝ, Karel. *Elektrotechnika I*. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2003. ISBN 80-213-1023-5.
- [4] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika I*. 5. nezměn. vyd. Praha: Informatorium, 2005, 191 s. ISBN 80-733-3043-1.
- [5] Wikipedia: the free encyclopedia. *Solenoid* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Poslední změna 28.11.2020 16:18 [cit. 29.11.2020]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Solenoid>
- [6] Learn More about Ferrite Cores. *Magnetics* [online]. [Cit. 28.11.2020]. Dostupné z: <https://www.mag-inc.com/Products/Ferrite-Cores/Learn-More-about-Ferrite-Cores>
- [7] ArcelorMittal Technotron s.r.o. *Produkty*. Toroidní jádra [online]. Poslední změna 29. 10. 2008 [cit. 9.3.2021]. Dostupné z: [https://web.archive.org/web/20100218022534/http://www.technotron.cz/AMT\\_programme21\\_cz.aspx](https://web.archive.org/web/20100218022534/http://www.technotron.cz/AMT_programme21_cz.aspx)
- [8] DPS Elektronika od A do Z. *Vytvoření planární (rovinné) cívky na DPS v programu PADS* [online]. [cit. 9.3.2021]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/rubriky/aktualni-zpravy/id:67208/vytvoreni-planarni-rovinne-civky-na-dps-v-programu-pads>
- [9] Sectron. *RFID tagy* [online]. [cit. 9.3.2021]. Dostupné z: <https://eshop.sectron.cz/cs/rfid/rfid-tagy/>
- [10] Wikipedia: the free encyclopedia. *Q faktor* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Poslední změna 29.11.2020 6:04 [cit. 3.12.2020]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Q\\_factor](https://en.wikipedia.org/wiki/Q_factor)
- [11] PMEC. *Cívka* [online]. Ing. Josef Jansa. Poslední změna 14.9.2020 [cit. 9.3.2021]. Dostupné z: [http://www.pmec.cz/data/pear01\\_08.pdf](http://www.pmec.cz/data/pear01_08.pdf)
- [12] Interní informační síť PikWiki
- [13] ISO 9001 Quality Management System Certification [online]. [cit. 5.3.2021]. Dostupné z: <https://www.tuvsud.com/en/services/auditing-and-system-certification/iso-9001>
- [14] ElektriKa.cz. *Třídy tepelné odolnosti elektrické izolace* [online]. 03.03.2003. [Cit. 9.3.2021]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/tto030303>
- [15] Labara. *Vodiče pro vinutí* [online]. [cit. 9.3.2021]. Dostupné z: <https://www.labara.cz/cs/vodice-pro-vinuti/179-vodice-pro-vinuti>
- [16] Wikipedia: the free encyclopedia. *Spulenkörper* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, Poslední změna 12.3.2013 [cit. 9.3.2021]. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/Spulenk%C3%B6rper?oldid=45638122>
- [17] Magnetics. *Hardware: Accessories for Ferrite & Powder Cores* [online]. Pittsburgh (PA): 2018. [cit. 13.3.2021]. Dostupné z: <https://www.mag-inc.com/Products/Ferrite-Cores/Hardware>
- [18] TDK. *Ferrites and accessories*. ETD 29/16/10 Core and accessories [online]. 05.2017. [cit. 14.3.2021]. Dostupné z: [https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/etd\\_29\\_16\\_10.pdf](https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/80/db/fer/etd_29_16_10.pdf)

- [19] LABARA. *Nomex*<sup>®</sup> [online]. Velká Bíteš: 2021. [cit. 14.3.2021]. Dostupné z: <https://www.labara.cz/cs/flex-izol-lep-pasky/flexibilni-izolacni-materialy/nomex-kapton-mylar-prespan/1525-nomex>
- [20] Ciba Specialty Chemicals. *Araldite Casting Resin System* [online]. 06.1998. [cit. 16.3.2021]. Dostupné z: <http://www.lindberg-lund.fi/files/Tekniske%20datblad/VAN-CW224384-TD.pdf>
- [21] WEVO. *WEVO-Casting Resin PU 390* [online]. 01.2003. [cit. 18.3.2021]. Dostupné z: <http://www.lindberg-lund.fi/files/Tekniske%20datblad/wevo-PU390.pdf>
- [22] Performance-coatings. *Polyurethane Casting Resins*. Herberts<sup>®</sup> Electro Casting Resins [online]. 18.05.2005. [cit. 18.3.2021]. Dostupné z: <http://www.performance-coatings.org/en/industrial-coatings/ct-he-pi-casting-resins.htm>
- [23] Synflex. *Impregnants*. DuPont<sup>™</sup> Herberts<sup>®</sup> Electro 1K Dip Resin E 8571 Voltatex<sup>®</sup> 4001 [online]. 02.2008. [cit. 18.3.2021]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/36036389/1k-resin-e-8571-voltatex-4001>
- [24] Elantas Electrical Insulation. *Elmotherm*<sup>®</sup> FS 190 [online]. San Martino: Elantas, 04.2014. [cit. 18.3.2021]. Dostupné z: <https://www.mewa-electronic.com/index.php?lang=1&cl=download&sfileid=rm69f4986f785900b654add50c5beb96>
- [25] Henkel-adhesives. *LOCTITE AA 326 Konstrukční lepidlo* [online]. 2021. [cit. 20.3.2021]. Dostupné z: [https://www.henkel-adhesives.com/cz/cs/produkt/structural-adhesives/loctite\\_aa\\_326.html](https://www.henkel-adhesives.com/cz/cs/produkt/structural-adhesives/loctite_aa_326.html)
- [26] UHU. *UHU PLUS endfest 300 EPOXY 163 g* [online]. 2021. [cit. 20.3.2021]. Dostupné z: <https://www.uhu.cz/uhu-plus-endfest-300-epoxy-163-g.html>
- [27] UHU. *UHU PLUS 5 min schnellfest 50 ml* [online]. 2021. [cit. 20.3.2021]. Dostupné z: <https://www.uhu.cz/uhu-plus-5-min-schnellfest-50-ml.html>
- [28] MACH, Pavel. *Montáž v elektronice*. Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje. 1. vydání. SKOČIL, Vlastimil, URBÁNEK, Jan. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 440 s. ISBN 80-01-02392-3.
- [29] SMT centrum. *Tavidla bez čištění* [online]. Ostřešany: 28.06.2017. [cit. 22.3.2021]. Dostupné z: <https://www.smtcentrum.cz/vyber-tavidel/tavidla-bez-cistení/>
- [30] CHOZE hobbybastler. *Indukčnosti a vlastnosti jader III* [online] 12.05.2012. [cit. 22.3.2021]. Dostupné z: <http://choze.aspone.cz/tlumivkyIII.aspx>
- [31] GualityInspection. *What is the "AQL" (Acceptance Quality Limit) in simple terms?* [online] 28.08.2018. [cit. 22.3.2021]. Dostupné z: <https://qualityinspection.org/what-is-the-aql/>
- [32] AsisImport s.r.o. *TECHNICKÝ LIST*. Kyanoakrylátové lepidlo [online] Úvaly 2021. [cit. 24.3.2021]. Dostupné z: [https://www.ait-praha.cz/attachments/article/26/Technicky\\_list\\_lepidla\\_AiT\\_rev\\_1.pdf](https://www.ait-praha.cz/attachments/article/26/Technicky_list_lepidla_AiT_rev_1.pdf)
- [33] TPC. *Navíjačka ERN 22* [online] 2021. [cit. 28.3.2021]. Dostupné z: <http://www.tpc.sk/sk/produkty-sk/navijacky-stolove/ern-22>
- [34] Marsilli. *Coil Solutions* [online] 2020. [cit. 28.3.2021]. Dostupné z: <https://marsilli.com/coilsolutions/>
- [35] Gorman Machine. *900A Toroid Coil Winder* [online] 2020. [cit. 28.3.2021]. Dostupné z: <https://gormanmachine.com/900A.html>
- [36] THE RUFF GROUP. *Tischmaschinen / RWE* [online] 2021. [cit. 28.3.2021]. Dostupné z: <https://www.ruff-worldwide.de/deutsch/ringbewickelmaschinen/tischmaschinen-rwe/>

- [37] Ing. Vladimír Volko. *Slovníček výkonného podniku*. Co je to: "One Piece Flow"? [online] 2021. [cit. 1.4.2021]. Dostupné z: [https://www.volko.cz/slovník\\_vykonnosti.php?ID\\_term=12](https://www.volko.cz/slovník_vykonnosti.php?ID_term=12)
- [38] Voltech. *AT3600 User Manual* [online] 2021. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: [https://www.voltech.com/Articles/098-024/001/1\\_2\\_AT3600\\_Features\\_Summary](https://www.voltech.com/Articles/098-024/001/1_2_AT3600_Features_Summary)
- [39] IPC Build Electronics Better. *IPC Standard Certifications*. The Standard in Electronics Manufacturing Knowledge [online] Bannockburn (IL): 2021. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://www.ipc.org/ipc-certifications>
- [40] IPC-A-610E-CZ. *Kritéria přijatelnosti elektronických sestav*. Vyd. E. Bannockburn (IL): IPC Association Connecting Electronics Industries, 2010
- [41] Tagarno. *Digitalmikroskope* [online] 2021. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://tagarno.com/de/digital-microscopes/>
- [42] SMT centrum. *Kritéria krimpování* [online]. Ostřešany: 21.06.2017. [cit. 9.4.2021]. Dostupné z: <https://www.smtcentrum.cz/mereni-kvality-krimpu/kriteria-krimpovani/>