



**Středoškolská technika 2018**

**Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT**

# **Návrh a optimalizace piezoelektrického transformátoru**

**Matouš Pikous**

Doctrina-Podještědské gymnázium s.r.o.

Sokolovská 328, Liberec 14

## **Poděkování**

Děkuji panu profesorovi Jiřímu Erhartovi za cenné rady, které mi poskytl v průběhu konzultací, a za možnost provést všechna měření v jeho laboratoři.

## Anotace

Tato práce se zabývá piezoelektrickými transformátory. Cílem práce bylo sestavit funkční piezoelektrický transformátor a proměřit závislost jeho účinnosti na poměru šířek elektrod a odporu ve výstupním obvodu. Do práce byly přidány informace o piezoelektrickém jevu, piezoelektrické keramice a piezoelektrických transformátorech. V rámci práce byly proměřeny a dopočítány materiálové vlastnosti vzorků a vzorce pro výpočty byly přidány do teoretické části.

**Klíčová slova:** Piezoelektrika, piezoelektrický transformátor, piezoelektrická keramika, transformace napětí.

## Annotation

This thesis is focused on piezoelectric transformers. The main aim was to make a fully functional piezoelectric transformer and to measure the dependence of its efficiency on resistance in secondary circuit and aspect ratio of its electrodes. Brief information about piezoelectricity, piezoelectric ceramics and transformers was added. Measured properties of used material could be found in this thesis for all samples. Equations describing these properties are added to the theoretical part.

**Keywords:** Piezoelectricity. Piezoelectric transformers, piezoelectric ceramic, voltage transformation.

# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>5</b>
<b>1 PIEZOELEKTRICKÝ JEV</b> .....	<b>6</b>
1.1 DEFINICE PIEZOELEKTRICKÉHO JEVU .....	6
1.2 HISTORIE PIEZOELEKTRIKY .....	7
1.3 PIEZOELEKTRICKÁ KERAMIKA .....	8
<b>2 PIEZOELEKTRICKÝ TRANSFORMÁTOR</b> .....	<b>9</b>
2.1 DEFINICE.....	9
2.2 TYPY PIEZOELEKTRICKÝCH TRANSFORMÁTORŮ.....	9
2.3 VÝHODY PIEZOELEKTRICKÝCH TRANSFORMÁTORŮ .....	11
2.4 NEVÝHODY PIEZOELEKTRICKÝCH TRANSFORMÁTORŮ .....	11
<b>3 VLASTNOSTI KERAMIKY A TRANSFORMÁTORU</b> .....	<b>12</b>
3.1 VELIČINY POPISUJÍCÍ PIEZOELEKTRICKOU LÁTKU .....	12
3.2 VELIČINY POPISUJÍCÍ PIEZOELEKTRICKÝ TRANSFORMÁTOR .....	15
<b>4 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ VZORKŮ</b> .....	<b>16</b>
<b>5 VÝROBA PIEZOELEKTRICKÉHO TRANSFORMÁTORU</b> .....	<b>20</b>
5.1 POUŽITÉ POMŮCKY .....	20
5.2 POSTUP .....	20
<b>6 MĚŘENÍ ÚČINNOSTI A TRANSFORMAČNÍHO POMĚRU</b> .....	<b>22</b>
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>26</b>
<b>ZDROJE</b> .....	<b>27</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>30</b>

# Úvod

Cílem práce je vyrobit funkční piezoelektrický transformátor a změřit závislost jeho účinnosti a transformačního poměru v závislosti na rozměru elektrod a zátěži na výstupu. Dílčí cíle práce jsou nalézt hodnoty transformačního poměru naprázdno a účinnosti piezoelektrického transformátoru pro optimální zátěž.

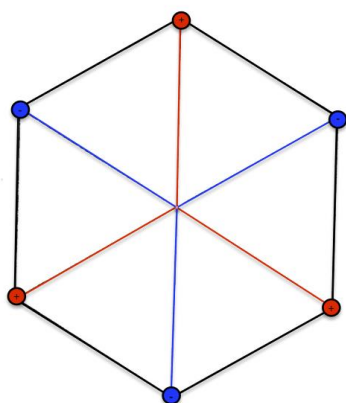
Práce je rozdělena na dvě části: teoretickou a praktickou. První část je rozdělena do čtyř kapitol a pojednává o piezoelektrické a piezoelektrických keramikách, dále je zaměřena na princip fungování piezoelektrických transformátorů. Poslední kapitola teoretické části je věnována vlastnostem popisujícím piezoelektrické materiály a piezoelektrické transformátory a je doplněna vzorci pro výpočty.

Praktická část je rozdělena do dvou kapitol a je věnována měření závislosti transformačního poměru a účinnosti piezoelektrického transformátoru na rozměru jeho elektrod a na zátěži na výstupu. Dále je obsahem praktické části vyhodnocení grafů těchto závislostí a určení transformačního poměru naprázdno. Zároveň je v praktické části uveden postup pro výrobu funkčního piezoelektrického transformátoru.

# 1 Piezoelektrický jev

## 1.1 Definice piezoelektrického jevu

Piezoelektrický jev je takový jev, při kterém se pomocí mechanického tlaku vytváří elektrický náboj. Tento jev nazýváme jevem přímým. Existuje také piezoelektrický jev nepřímý, což je schopnost materiálu deformovat se vlivem elektrického pole.<sup>1</sup> Aby piezoelektrický jev mohl nastat, musí mít krystal specifickou krystalickou mřížku. U středově symetrických krystalických mřížek, jako jsou například krystalické mřížky kovů, piezoelektrický jev nenastává, protože středy symetrie aniontů a kationtů zůstávají souhlasné. U piezoelektrických látek zůstávají středy symetrie kladně nabitých a záporně nabitých iontů souhlasné pouze tehdy, není-li krystal nikterak deformován. (Viz obr. č. 1.)



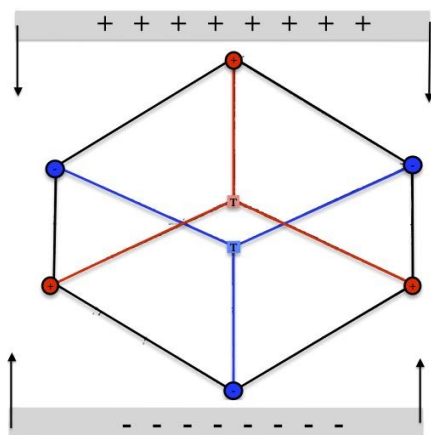
Obr. č. 1

*Příklad krystalická mřížky piezoelektrického materiálu. Na materiál není působeno silou, a tak jsou zatím středy symetrie souhlasné. Na plochách materiálu zatím není generován žádný náboj.*

Budeme-li však na materiál působit silou a tím jej deformovat, budou se kladně nabitě a záporně nabitě částice posouvat a těžiště kladných a záporných iontů se od sebe začnou vzdalovat. Z krystalu se takto vytvoří dipól a na jeho plochách se objeví náboj. (Viz obr. č. 2)

---

<sup>1</sup> Piezoelektrické jevy: Základy piezoelektrických jevů a jejich aplikace v moderních technologiích. České vysoké učení technické fakulta strojní ústav fyziky [online]. Praha: neuvedeno, neuveden [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: [http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT\\_11.pdf](http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf)



Obr. č. 2

*Příklad krystalické mřížky piezoelektrického materiálu, na který je působeno silou. Krystalická mřížka je deformována a středy symetrie se posouvají, tím vzniká na plochách piezoelektrického prvku náboj.*

Nepřímý piezoelektrický jev nastává, připojíme-li na elektrody materiálu elektrické napětí. Ionty v materiálu se začnou posunovat, tím dochází k deformaci krystalu. U nepřímého jevu působí vnější elektrické pole na ionty silou, čímž se krystal deformuje. Koeficienty popisující přímý a nepřímý piezoelektrický jev mají teoreticky stejnou velikost. Při připojení střídavého napětí začne krystal kmitat, čehož je možné využít například v ultrazvukových generátorech. Je-li frekvence generovaného kmitání odpovídající frekvenci vlastních kmitů materiálu, dochází k mechanické rezonanci.

## 1.2 Historie piezoelektriny

Piezoelektrický jev byl objeven a popsán roku 1880 bratry Curieovými. O rok později Jonas Ferdinand Gabriel Lippmann předpověděl nepřímý piezoelektrický jev. Bratři Curieové následně jeho předpověď experimentálně prokázali.

Ke zkoumání piezoelektrických jevů byly nejprve používány přírodní monokrystaly turmalínu. Záhy se však začaly pro výzkum používat i jiné monokrystaly, z nichž nejdůležitější je křemen, který se následně stal nejpoužívanější piezoelektrickou látkou. Za druhé světové války se stal přírodní křemen těžko dostupným, a tak se začal vyrábět synteticky. Zároveň se však nahrazoval jinými piezoelektrickými materiály, a to nejčastěji polykrystalickými.

První piezoelektrickou polykrystalickou látkou byl titaničitan barnatý  $\text{BaTiO}_3$ . Ten byl v roce 1953 nahrazen tuhým roztokem zirkoničitan-titaničitanu olovnatého  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ . Dále byly připraveny třeba niobáty nebo tantaláty.

V současné době se používají jak monokrystalické piezoelektrické látky, tak polykrystalická piezoelektrika. Křemen je používán hlavně v případech, ve kterých je nutná vysoká mechanická jakost, ale nevýhodou je, že jeho monokrystaly jsou malé, a tak je velikost výrobků z něj limitována. Polykrystalické materiály naproti tomu mohou být používány k výrobě téměř libovolně velikých výrobků. Navíc je možné u polykrystalických materiálů měnit složení a tím i jejich fyzikální vlastnosti. Nejrozšířenějšími piezoelektrickými materiály, které se vyrábí, jsou tuhé roztoky  $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ , které mohou mít různá označení jako např. PZT nebo PXE (obchodní označení společnosti Philips).<sup>2</sup> Piezoelektrické materiály jsou v dnešní době velmi rozšířené a dobře dostupné. Používají se například v mikrofonech, snímačích zvuku nebo v zapalovačích.

### 1.3 Piezoelektrická keramika

Piezoelektrické materiály jsou takové materiály, jejichž základní krystalická buňka nemá střed symetrie. Takovéto materiály mohou být buď přírodní, jako je křemen nebo turmalín, nebo uměle vyrobené, jako jsou piezoelektrické keramiky. Piezoelektrické keramiky jsou směsí tuhých roztoků  $\text{PbZrO}_3$ , zkráceně PZ, a  $\text{PbTiO}_3$ , zkráceně PT. Z těchto zkratk je odvozen název „PZT keramiky“. Piezoelektrické keramiky mají samy o sobě neuspořádanou strukturu molekul a jsou tvořeny tzv. zrny, která mají náhodnou orientaci, a proto makroskopicky nemají piezoelektrické vlastnosti. PZT keramiky je třeba vystavit silnému elektrickému poli a nechat je polarizovat. V silném elektrickém poli se dipóly orientují ve směru tohoto pole. Poté, co elektrické pole přestane na keramiku působit, zůstanou zrna víceméně orientovaná směrem, kterým na ně působilo pole.<sup>3</sup> Mimo PZT keramik se používají i bezolovnaté keramiky, na jejichž vývoj se v dnešní době klade důraz. Dále se jako piezoelektrické materiály používají flexibilní polymerové materiály.

---

<sup>2</sup> ČERMÁK, František, Dobroslav ČERNOHLÁVEK, Jindřich HIRŠL a Oto STEFAN. Keramická piezoelektrika: Vlastnosti a technické použití. Praha: Tesla - Výzkumný ústav pro sdělovací techniku A. S. Popova, 1970.

<sup>3</sup> Piezoelektrické jevy: Základy piezoelektrických jevů a jejich aplikace v moderních technologiích. České vysoké učení technické fakulta strojní ústav fyziky [online]. Praha: neuvedeno, neuveden [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: [http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT\\_11.pdf](http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf)



## 2 Piezoelektrický transformátor

### 2.1 Definice

Piezoelektrické transformátory jsou elektronické součástky určené k transformaci střídavého napětí pomocí piezoelektrických jevů. V primárním obvodu je piezoelektrický transformátor buzen pomocí nepřímého piezoelektrického jevu vstupním napětím o vhodné frekvenci. Díky společné mechanické deformaci primárního i sekundárního obvodu je v sekundárním obvodu pomocí přímého piezoelektrického jevu generováno napětí.

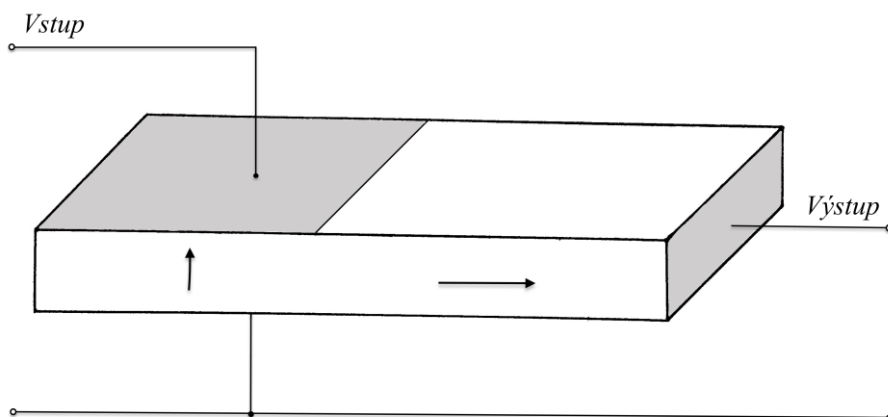
Transformační poměr závisí na mnoha proměnných, jako jsou koeficienty elektromechanické vazby a mechanické jakosti, a na rozměrech a tvaru transformátoru. Největší transformační poměr získáme při budící frekvenci blízké frekvenci vlastních kmitů vzorku, takzvané rezonanční frekvenci prvku, protože právě v této frekvenci a k ní harmonickým frekvencím dochází k největší deformaci materiálu. Čím větší je deformace materiálu, tím větší je napětí na výstupu. <sup>4</sup>

### 2.2 Typy piezoelektrických transformátorů

Piezoelektrické transformátory můžeme rozdělit do dvou základních skupin – na homogenní (jednovrstvé) a heterogenní (vícevrstvé). Homogenní piezoelektrické transformátory jsou tvořeny jednou piezokeramickou destičkou, která může mít různý tvar a rozměry. Heterogenní jsou tvořeny vrstvami piezokeramických destiček. Dále můžeme dělit piezoelektrické transformátory podle tvaru. Mezi první použitelné transformátory se zařadil tzv. Rosenův typ transformátoru (viz obr. č. 3). Jedná se o jednovrstvý tyčinkový transformátor, který není homogenně polarizován. Vstupní polovina je polarizována ve směru tloušťky. Výstupní polovina je polarizována ve směru délky. Konstrukční vadou tohoto transformátoru je místo styku těchto dvou částí, protože se při základní rezonanční frekvenci se v něm nachází uzel kmitu, a tedy maximum mechanického pnutí, které může vést k narušení transformátoru. Rosenův typ byl dále vylepšován a využit i ve vícevrstvných transformátorech.

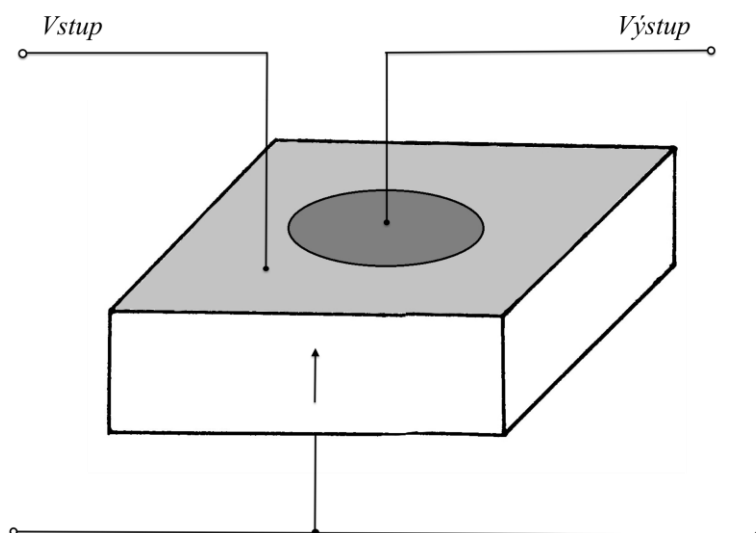
---

<sup>4</sup> PŮLPÁN, Petr a Jiří ERHART. Piezoelektrické transformátory. *Elektro*. 2006, (1), 5.



Obr. č. 3  
Piezoelektrický transformátor Rosenova typu s vyznačenými elektrodami. Šipky označují směry polarizace.

Další typy piezoelektrických transformátorů jsou typy „ring-dot“ (viz obr. č. 4), který je také jednovrstvý. Oproti Rosenovu typu je polarizován pouze ve směru tloušťky, což je technologicky jednodušší. Transformátory „ring-dot“ mají jednu centrální elektrodu ve tvaru kruhu nebo čtverce, která je obklopena druhou elektrodou. Na protější ploše transformátoru „ring-dot“ je třetí, společná elektroda. Podskupinou transformátorů „ring-dot“ jsou prstencové piezoelektrické transformátory. Ty, jak již název napovídá, jsou ve středu centrální elektrody prázdné a mají prstencový tvar. Existují také ohybové transformátory a transformátory tvořené více vrstvami.



Obr. č. 4  
Piezoelektrický transformátor typu „ring-dot“.

Piezelektrické transformátory mají různé módy kmitu, přičemž ten vhodný pro použití se vybere na základě směru polarizace, tvaru a rozměrů transformátoru a rozložení elektrod. Jak jednovrstvé, tak vícevrstvé piezelektrické transformátory mohou mít zesílení elektrického napětí větší nebo menší než jedna, a to v závislosti na poměru velikosti elektrod, zátěži na sekundárním obvodu a budící frekvenci.<sup>5</sup>

### 2.3 Výhody piezelektrických transformátorů

Piezelektrické transformátory mohou mít malé rozměry a hmotnost a zároveň je jejich účinnost vysoká, vyšší než 90 %, protože oproti elektromagnetickým transformátorům se neztrácí energie vlivem vířivých proudů v cívce při vysokých frekvencích a transformace probíhá mechanickou deformací jednoho článku. Navíc si piezelektrické transformátory oproti elektromagnetickým udržují vysokou účinnost i při vysokých frekvencích, protože u nich nedochází ke ztrátám vlivem magnetických hysterezí v jádře. (Hysterezní smyčky vznikají přemagnetováním materiálu a ztráty v těchto smyčkách jsou přímo úměrné ploše dané hysterezní smyčky, objemu feromagnetika a frekvenci. Energie se uvolňuje ve formě tepla.) Piezelektrické transformátory jsou navíc nehořlavé a nevytváří elektromagnetický šum na rozdíl od běžných transformátorů, a proto jsou dobře uplatnitelné v moderní elektronice.<sup>5</sup>

### 2.4 Nevýhody piezelektrických transformátorů

Hlavní nevýhody piezelektrických transformátorů jsou spojeny s jejich generováním tepla vlivem vnitřního tření při mechanické deformaci transformátoru. Při zvyšování teploty u některých keramických materiálů dochází ke změně piezelektrických vlastností a při Curieově teplotě (pro každý materiál různá) některé materiály ztrácí piezelektrické vlastnosti úplně. Zároveň některé materiály podléhají „stárnutí“ a jejich piezelektrické vlastnosti jsou degradovány časem.<sup>5</sup>

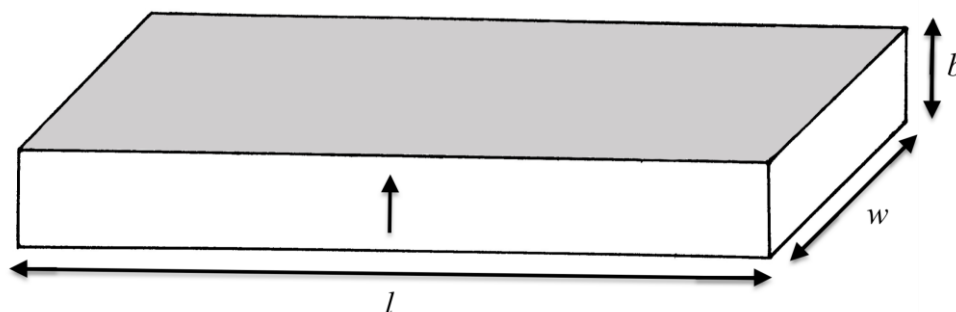
---

<sup>5</sup> PŮLPÁN, Petr a Jiří ERHART. Piezelektrické transformátory. *Elektro*. 2006, (1), 5.

## 3 Vlastnosti keramiky a transformátoru

### 3.1 Veličiny popisující piezoelektrickou látku

Základní veličiny popisující vzorky piezoelektrické keramiky jsou rozměry  $l$  (délka vzorku),  $w$  (šířka vzorku) a  $b$  (tloušťka vzorku). Všechny vzorky byly polarizovány ve směru tloušťky. (Viz obr. č. 5) Zároveň je pro popis keramických vzorků důležitá jejich hmotnost  $m$ , která je nezbytná pro výpočet hustoty  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].



Obr. č 5.

Vzorek piezoelektrické keramiky se znázorněnými rozměry. Šipka v ploše vzorku znázorňuje směr polarizace.

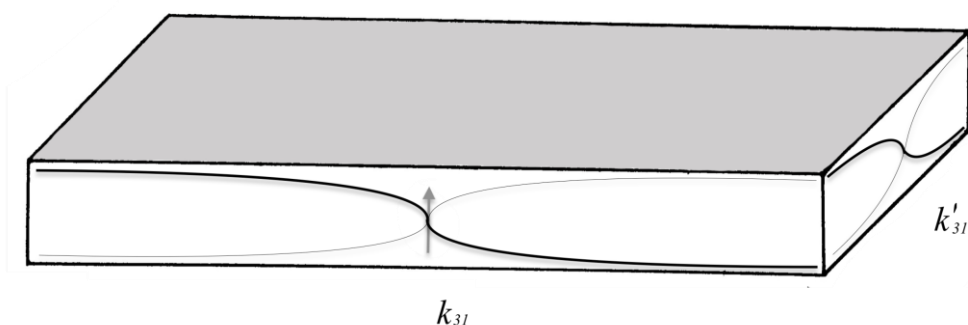
Připojíme-li na piezoelektrický prvek zdroj střídavého proudu, prvek začne mechanicky kmitat. Blíží-li se budící frekvence frekvenci vlastních kmitů, dochází k rezonanci, což je stav, při kterém se dodávaná energie buzením nejefektivněji přetváří v kmitání. Amplitudy kmitů se při rezonanci až řádově zvětšují. Frekvenci, pro kterou rezonance nastává, nazýváme rezonanční frekvence  $f_r$  [Hz]. V grafu závislosti impedance na frekvenci se rezonanční frekvence a k nim jejich harmonické frekvence projeví prudkým poklesem impedance, která následně stoupá a pak se vrací zpět ke své původní tendenci. Místům s lokálně nejnižší impedancí odpovídá rezonanční frekvence, zatímco frekvenci s lokálně nejvyšší impedancí odpovídá tzv. antirezonanční frekvence  $f_a$  [Hz].

V závislosti na rozměrech vzorku se vyskytují různé módy kmitu. Hodnotu efektivity přeměny elektrické energie na mechanickou práci nebo hodnotu efektivity přeměny mechanické práce na elektrickou energii udává koeficient mechanické vazby  $k_{jk}$ , kde  $j$  je koeficient určující směr polarizace a  $k$  je koeficient popisující směr, v kterém je vykonávána

mechanická rezonance. Pro vzorky keramiky jsou důležité módy kmitu  $k_{31}$  a  $k'_{31}$ . (viz obr. č. 6) Pro výpočet obou koeficientů mechanické vazby platí: <sup>6</sup>

$$k_{31} = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{\text{tg}\eta_a}{\eta_a}}} \quad (1)$$

Jediný rozdíl pro tyto módy kmitu je hodnota vlnového čísla  $\eta_a$ , a proto i hodnoty  $k_{31}$  a  $k'_{31}$  jsou různé. Vlnové číslo je bezrozměrná veličina.



Obr. č. 6

Na obrázku jsou schematicky zvýrazněné profily výchylky pro módy kmitu  $k_{31}$  a  $k'_{31}$ .

Pro rezonanční frekvenci u  $k_{31}$  platí:

$$f_r = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{11}^E}} \quad (2)$$

Pro rezonanční frekvenci u  $k'_{31}$  platí:

$$f_r = \frac{1}{2w} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{11}^E (1 - \sigma^2)}} \quad (3)$$

$s_{11}^E$  je značka pro elastickou poddajnost a její jednotka je  $[\text{Pa}^{-1}]$ . Elastická poddajnost určuje, jak snadno se deformuje těleso. Pro izotropní látku (látku, jejíž vlastnosti jsou ve všech směrech stejné) je elastická poddajnost převrácenou hodnotou Youngova modulu pružnosti  $E$  [Pa]. Rovnice (2) a (3) se dají přepsat do vztahu pro  $s_{11}^E$ .

$$s_{11}^E = \frac{1}{4l^2 f_r^2 \rho} \quad (4)$$

<sup>6</sup> ERHART, Jiří, Petr PŮLPÁN a Martin PUSTKA. Piezoelectric ceramic resonators. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-42480-4.

$$s_{11}^E = \frac{1}{4w^2 f_r^2 \rho (1 - \sigma^2)} \quad (5)$$

$\sigma$  [-] je tzv. Poissonův modul, nebo také Poissonova konstanta, a označuje poměr relativního zúžení ve směrech kolmých ke směru, ve kterém se těleso relativně prodlouží. Z rovnice (5) je možné vyjádřit Poissonův modul.

$$\sigma = \sqrt{1 - \frac{1}{4w^2 f_r^2 \rho s_{11}^E}} \quad (6)$$

Pro vlnové číslo  $\eta$  u módu kmitu  $k_{31}$  platí

$$\eta = 2\pi f \frac{l}{2} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{11}^E}} \quad (7)$$

a pro vlnové číslo u módu kmitu  $k'_{31}$  platí

$$\eta = 2\pi f \frac{w}{2} \sqrt{\frac{1}{\rho s_{11}^E (1 - \sigma^2)}} \quad (8)$$

Dielektrické vlastnosti piezoelektrické látky udává permitivita  $\varepsilon$  [ $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ], což je veličina, která udává změnu polarizace dielektrika při působení elektrického pole. Vypočítá se jako součin permitivity vakua  $\varepsilon_0$  (pro dokonalé vakuum je hodnota  $\varepsilon_0$  rovna  $8,854 \times 10^{-12}$   $\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$ ) a relativní permitivity.  $\varepsilon_{33}^T$  je permitivita materiálu vystaveného stálému mechanickému napětí, což je označeno písmenem  $T$ . Koeficienty 3 a 3 určují směry elektrické indukce a elektrického pole. Permitivitu  $\varepsilon_{33}^T$  lze vypočítat podle

$$\varepsilon_{33}^T = \frac{C_{33}^T b}{\varepsilon_0 l w} \quad (9)$$

kde  $C_{33}^T$  je kapacita piezoelektrického prvku.

Elektrická indukce  $D$  [ $\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$ ] je fyzikální veličina, která definuje, kolik náboje se indukuje na jednotku plochy.  $D_3$  je potom elektrická indukce ve směru polarizace a určuje, kolik náboje se vygeneruje na plochách kolmých ke směru polarizace. Pro výpočet  $D_3$  platí vzorec

$$D_3 = d_{33} T_3 \quad (10)$$

kde  $T_3$  je elastické napětí, což je veličina popisující velikost vnitřních sil tělesa, které brání deformaci, v závislosti na ploše kolmé ke směru deformace.

Hodnotu náboje generovaného jednotkovým mechanickým tlakem udává veličina zvaná piezoelektrická nábojová konstanta. Popisuje tak piezoelektrickou vlastnost vzorku. Je značena písmenem  $d_{jk}$ , kde  $j$  je koeficient určující normálu plochy s generovaným

nábojem a  $k$  je koeficient určující směr, ve kterém se měnilo mechanické napětí zapříčiňující tvorbu náboje. Pro  $d_{31}$  platí

$$d_{31} = k_{31} \sqrt{\varepsilon_{33}^T \varepsilon_0 s_{11}^E} \quad (11)$$

Při buzení piezoelektrického prvku se část elektrické energie přeměňuje v energii tepelnou. Tato ztráta se uvádí jako  $tg\delta$  [-], kde  $\delta$  je tzv. ztrátový úhel. Ztrátový úhel je rozdíl mezi ideálním fázovým posunem a skutečným fázovým posunem mezi napětím a proudem cívky nebo kondenzátoru. Mechanické ztráty při deformaci prvku popisuje veličina činitel mechanické jakosti  $Q_m$  [-]. Zhruba určuje, po kolika kmitech se amplituda výchylek kmitání zmenší na polovinu.

### 3.2 Veličiny popisující piezoelektrický transformátor

Účinnost  $\eta$  [%] je veličina popisující podíl výkonu ku příkonu

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (12)$$

V případě transformátorů, které byly vytvořeny, jde o výkon v sekundárním obvodu ku výkonu v primárním obvodu. Výkon primárního obvodu se vypočítá podle

$$P_{in} = U_{in} I_{in} \cos\phi \quad (13)$$

kde  $U_{in}$  symbolizuje amplitudu vstupního napětí,  $I_{in}$  amplitudu vstupního proudu a  $\phi$  je fázový posun.

Výkon sekundárního obvodu se vypočítá podle stejného vzorce jako výkon v primárním obvodu, jediný rozdíl je, že v sekundárním obvodu je napětí a proud vždy ve fázi, protože je v něm připojen pouze rezistor, a tak je fázový posun nulový. Vztah pro  $P_{out}$  se dá přeformulovat pomocí zátěže  $R$ .

$$P_{out} = \frac{U_{out}^2}{R} \quad (14)$$

Zároveň je pro popis transformátoru důležitá veličina transformační poměr  $k$ . Ten se dá určit podle

$$k = \frac{U_{out}}{U_{in}} \quad (15)$$

Transformační poměr se také někdy nazývá zesílení.

## 4 Měření vlastností vzorků

Vzorky jsou vyrobeny z piezoelektrické keramiky PZT, typ NCE41 (hard PZT). Výrobce vzorků je firma Noliac Ceramics, s. r. o., Hradec Králové.<sup>7</sup>

Délka  $l$  a šířka  $w$  vzorku byly měřeny posuvným měřidlem s přesností na 0,05 mm. Tloušťka  $b$  byla měřena mikrometrem s přesností na 0,005 mm. Hmotnost vzorků byla měřena na digitální váze s přesností na 0,01 g. Z těchto hodnot byla dopočítána hustota jednotlivých vzorků. Hodnoty piezoelektrické nábojové konstanty  $d_{33}$  pro vzorky byly měřeny na  $d_{33}$ -metru (model ZJ-3C) s přesností 5 % a s rozsahu  $0 - 200 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$  a  $0 - 2000 \text{ pC} \cdot \text{N}^{-1}$ .<sup>8</sup> Hodnoty měření viz tabulka č. 1.

vzorek č.	$l$ [mm]	$w$ [mm]	$b$ [mm]	$m$ [g]	$\rho$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	$d_{33}$ [ $\text{pC} \cdot \text{N}^{-1}$ ]
#1	20,0	10,0	2,14	3,39	7920	268
#2	20,0	10,0	2,14	3,39	7920	266
#3	20,0	10,0	2,14	3,38	7900	263
#4	20,0	10,0	2,15	3,41	7930	266
#5	20,0	10,0	2,15	3,40	7900	267

Tabulka č. 1

Hodnoty délky, šířky, tloušťky, hmotnosti, hustoty a piezoelektrické nábojové konstanty.

Měření na impedančním analyzátoru Agilent 4294A bylo provedeno čtyřvodičovou metodou<sup>9</sup>.

Blíží-li se frekvence rezonanční frekvenci, impedance vzorku se blíží nule (admittance se blíží nekonečnu) a blíží-li se frekvence antirezonanční frekvenci, impedance stoupá (admittance klesá). Průběh impedance byl zaznamenán do grafu (viz graf 1). Grafy pro všechny vzorky a grafy s detaily frekvencí naleznete v příloze.

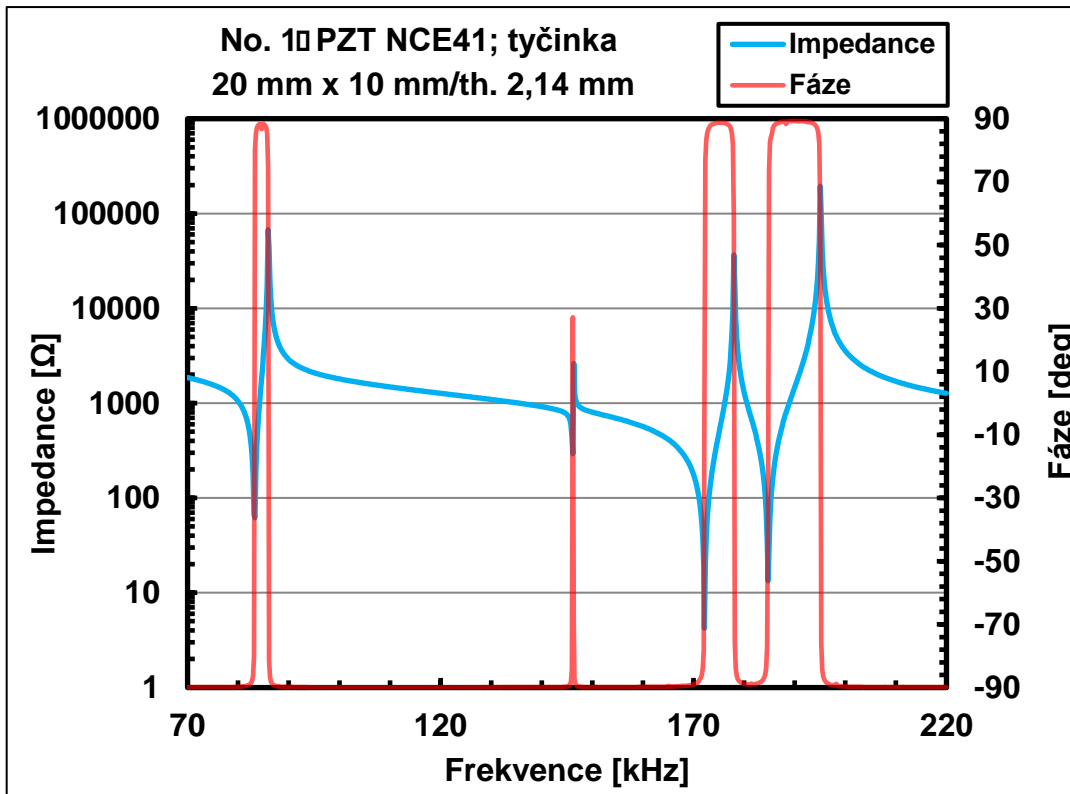
Naměřené hodnoty piezoelektrické konstanty a hustoty odpovídají hodnotám uvedeným výrobcem. Vzorky byly polarizovány v roce 2015, a jsou tedy dobře "vystárnuté" se stabilními vlastnostmi.

<sup>7</sup> Noliac Ceramics. (www.noliac.com)

<sup>8</sup> V  $d_{33}$ -metru je na piezoelektrický materiál působeno silou proměnnou v čase od  $F_{max}$  do  $-F_{max}$ , kde  $|F_{max}| = 0,227 \text{ N}$ , a to při frekvenci 110 Hz.

<sup>9</sup> U čtyřvodičové metody je voltmetr zapojen hned za prvkem, na kterém je napětí měřeno, protože když je odpor velmi malý, dochází ke zkreslení výsledků měření vlastním odporem vodičů.





Graf č. 1  
Impedanční spektrum piezoelektrického prvku.

Pro admitanci u módu kmitu  $k_{31}$  platí<sup>10</sup>

$$Y = j\omega\varepsilon_{33}^T \frac{lw}{b} (1 - k_{31}^2) \left( 1 + \frac{k_{31}^2 \operatorname{tg}\eta}{(1 - k_{31}^2)\eta} \right); \quad \omega = 2\pi f \quad (16)$$

$\omega$  je úhlová frekvence a  $j$  imaginární jednotka.

Bliží-li se admitance nekonečnu (rezonance), potom  $\operatorname{tg}\eta$  se blíží nekonečnu. Z čehož vyplývá, že  $\eta_r$  má hodnoty:

$$\eta_r = (2k - 1) \cdot \frac{\pi}{2}; \quad k \in \mathbb{N} \quad (17)$$

Bliží-li se admitance k nule (antirezonance), potom celá závorka  $\left( 1 + \frac{k_{31}^2 \operatorname{tg}\eta}{(1 - k_{31}^2)\eta} \right)$  se musí blížit k nule. Pro výpočet  $\eta_a$  se dá použít vztah (16) pro základní rezonanční a antirezonanční frekvenci a jejich vlnová čísla podle (7).

<sup>10</sup> ERHART, Jiří, Petr PŮLPÁN a Martin PUSTKA. Piezoelectric ceramic resonators. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-42480-4.

$$\frac{f_a}{f_r} = \frac{\eta_a}{\eta_r} \Rightarrow \eta_a = \eta_r \frac{f_a}{f_r} \quad (18)$$

A protože  $\eta_r = \frac{\pi}{2}$ , můžeme tuto hodnotu dosadit do vzorce a vyjde tak jednodušší vztah

$$\eta_a = \frac{\pi f_a}{2 f_r} \quad (19)$$

U módu kmitu  $k'_{31}$  je pro admitanci podobný vzorec, jako u módu kmitu  $k_{31}$ , ale vyskytuje se v něm  $k_p$ , což je planární koeficient elektromechanické vazby.

$$Y = j\omega\varepsilon_{33}^T \frac{lW}{b} (1 - k_p^2) \left( 1 + \frac{k'_{31}{}^2 \operatorname{tg}\eta}{(1 - k'_{31}{}^2)\eta} \right); \omega = 2\pi f \quad (20)$$

Z naměřených dat lze zjistit činitel mechanické jakosti  $Q_m$  a to jako poměr  $\frac{f_r}{\Delta f}$ , kde  $\Delta f$  je rozdíl frekvencí v okolí rezonanční frekvence, při kterých impedance vzorku dosahuje hodnot  $\sqrt{2} Z_{min}$ , kde  $Z_{min}$  je hodnota impedance při rezonanční frekvenci. Dále byly naměřeny hodnoty  $\operatorname{tg}\delta$ . Protože je  $k'_{31} > k_{31}$ , dá se očekávat, že mód  $k'_{31}$  bude transformovat s větším transformačním poměrem.

Všechny hodnoty byly vloženy do tabulek. (viz tabulky č. 2, 3 a 4)

vzorek č.	$f_r$ [kHz]	$f_a$ [kHz]	$\eta_a$	$k_{31}$
#1	83,219	86,006	1,6234	0,281
#2	82,988	85,838	1,6247	0,284
#3	83,188	85,981	1,6235	0,281
#4	82,994	85,844	1,6247	0,284
#5	83,081	85,969	1,6254	0,286

Tabulka č. 2

Naměřené hodnoty rezonančních a antirezonančních frekvencí a k nim  $\eta_a$  pro mód kmitu  $k_{31}$ .

vzorek č.	$f_r$ [kHz]	$f_a$ [kHz]	$\eta_a$	$k'_{31}$
#1	184,775	195,100	1,6588	0,357
#2	184,031	194,706	1,6619	0,363
#3	184,775	195,056	1,6582	0,356
#4	184,163	194,838	1,6618	0,363
#5	184,425	195,056	1,6613	0,362

Tabulka č. 3

Naměřené hodnoty rezonančních a antirezonančních frekvencí a k nim  $\eta_a$  pro mód kmitu  $k'_{31}$ .

vzorek č.	$C$ [pF]	$S_{11}^E$ [ $10^{-12}\text{Pa}^{-1}$ ]	$\sigma$ [-]	$\varepsilon_{33}^T$ [-]	$d_{31}$ [pC·N <sup>-1</sup> ]	$\text{tg}\delta$ [ $10^{-4}$ ]	$Q_m$ [-]
#1	993	11,4	0,434	1200	98	36	2272
#2	1069	11,5	0,432	1292	103	41	2263
#3	1028	11,4	0,435	1242	100	38	2177
#4	1060	11,4	0,433	1287	101	40	2022
#5	1054	11,5	0,434	1280	103	36	2239

Tabulka č. 4

Naměřené a vypočítané hodnoty ostatních vlastností vzorků.

# 5 Výroba piezoelektrického transformátoru

## 5.1 Použité pomůcky

K výrobě piezoelektrického transformátoru byly použity čtyři piezokeramické kvádry z piezoelektrické keramiky NCE41<sup>11</sup> o rozměrech 20 mm × 10 mm × 2,15 mm, polarizované ve směru kolmém na největší stěnu, tenké drátky, stříbrná pasta G3692 Acheson DAG1415 (dále jen stříbrná pasta)<sup>12</sup>, karbid křemíku (SiC) o jemnosti 400 zrn na 1 mm, nálepky, papír, tužka a pravítko s měřítkem.

## 5.2 Postup

### Úprava elektrod:

Karbidem křemíku byla na skleněné desce obroušena svrchní elektroda na všech piezokeramických destičkách. Z nálepky byl vystříhnut tenký proužek o šířce jeden milimetr a byl nalepen na místo obroušené elektrody. Stříbrnou pastou byly těsně okolo nálepky natřeny nové elektrody během lepení tak, aby nátěr zůstal pouze na jedné straně transformátoru a nepřesahoval přes hrany. Nakonec byla nálepka sloupnuta.

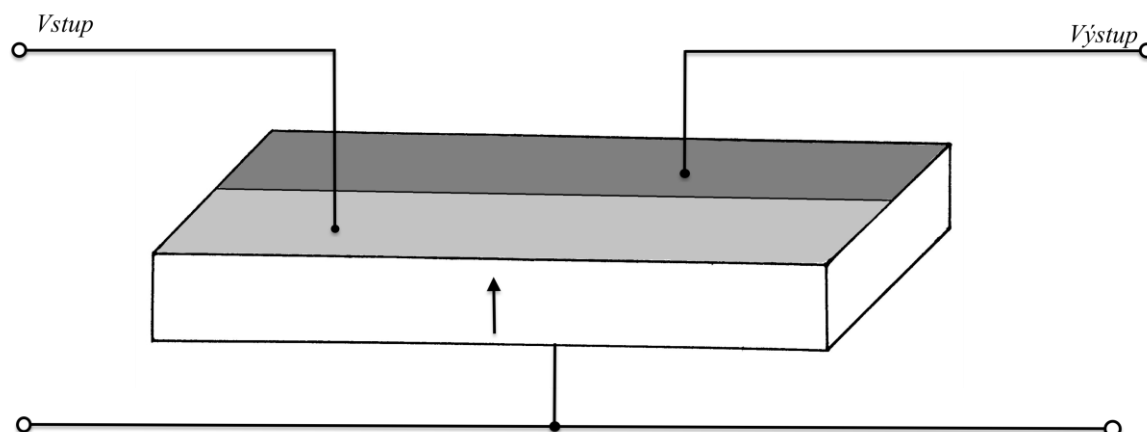
### Úpravy kontaktů:

Na každou elektrodu je potřeba připravit kontakt pro upevnění do měřících přístrojů. Na konci odizolovaného tenkého drátku byla utvořena malá smyčka pro lepší uchycení. Smyčka musí být přidržena u elektrody tak, aby se nehýbala. Smyčka byla zakápnuta stříbrnou pastou a následně se transformátor nechal chvíli zaschnout. Vytvořené transformátory je možno vidět na obrázku číslo 7.

---

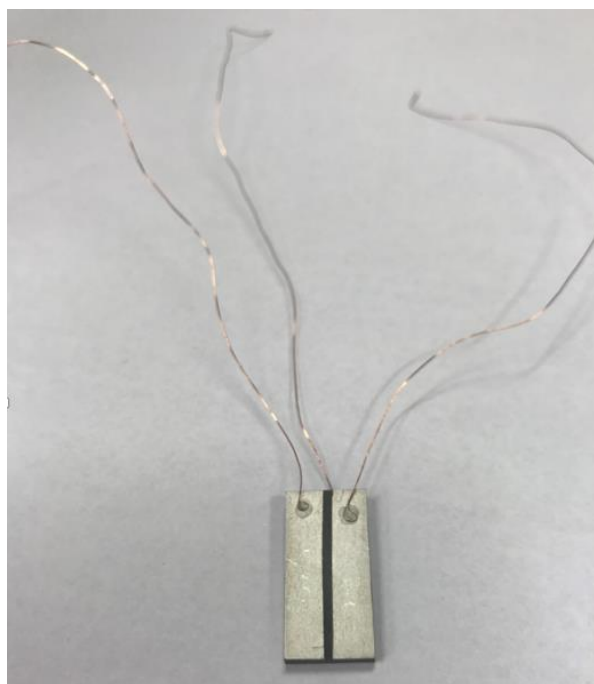
<sup>11</sup> Dostupná u firmy Noliac Ceramics. ([www.noliac.com](http://www.noliac.com))

<sup>12</sup> Dostupná u firmy Agar scientific. ([www.agarscientific.com](http://www.agarscientific.com))



Obr. 7a

Nákres piezoelektrického transformátoru – Na obrázku je znázorněn transformátor se vstupní a výstupní elektrodou a kontakty. Uzemňovací elektroda je na spodní straně transformátoru.



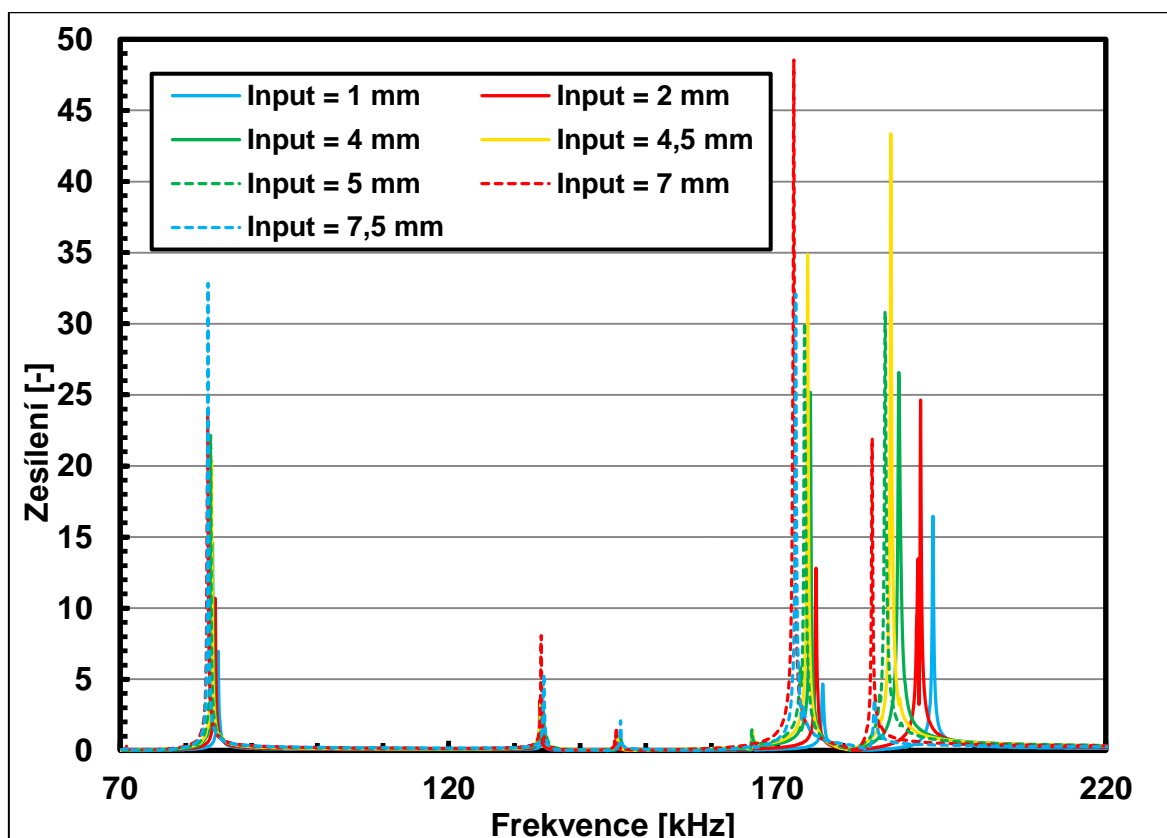
Obr. 7b

Fotografie vytvořeného piezoelektrického transformátoru, na které jsou vidět nově vytvořené elektrody transformátoru a připevněné vodiče. Černý pruh je místo, na kterém není nanášena žádná elektroda. Je nezbytné, aby se vstupní a výstupní elektrody nedotýkaly.

## 6 Měření účinnosti a transformačního poměru

### Zesílení napětí naprázdno

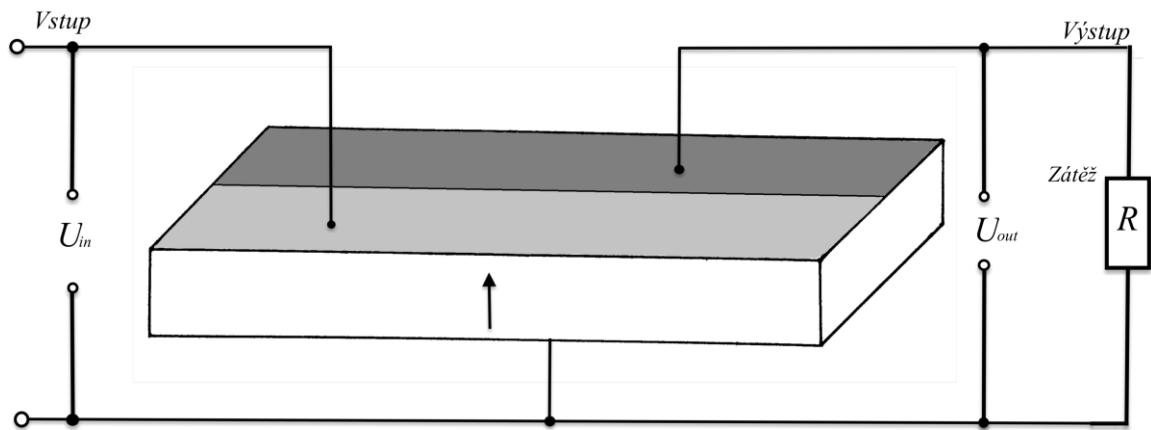
Hodnoty zesílení elektrického napětí v sekundárním obvodu naprázdno byly naměřeny na multimetru Agilent 34401A. Jako vstupní elektroda byly postupně použity obě elektrody na vzorcích. Data byla exportována a vložena do grafu. (Viz graf č. 2)



Graf č. 2

Hodnoty zesílení naprázdno pro všechny transformátory a šířky vstupní elektrody v závislosti na frekvenci.

K měření závislosti účinnosti a transformačního poměru na velikosti odporu na výstupu byla využita zařízení: Generátor funkcí Hewlett Packard 3325A, dva osciloskopy DSO3202A od firmy Agilent Technologies, proudová sonda CT-2 od firmy Tektronix s citlivostí 1 mV/1 mA a odporová dekáda R1-3000 od firmy Cosinus s rozsahem 1  $\Omega$  - 10 M $\Omega$ . Piezoelektrický transformátor byl zapojen podle nákresu viz obr. č. 8.



Obr. č. 8  
Zapojení piezoelektrického transformátoru do měřicího obvodu.

Na primární obvod byl přiváděn střídavý proud o frekvenci kolem 180 kHz, což je frekvence pro základní mód kmitu  $k'_{31}$ . (Časový průběh vstupního napětí byla sinusoida.) Vstupní napětí bylo měřeno na osciloskopu na prvním kanále. Na druhém kanále se pomocí proudové sondy měřil vstupní proud. V sekundárním obvodu byla připojena odporová dekáda, na které bylo měřeno napětí druhým osciloskopem. Sondy osciloskopu měly vnitřní odpor 1 M $\Omega$ .

Výkon  $P$  pro střídavý proud se vypočítá podle vztahu (13). Pro primární obvod platí vzorec

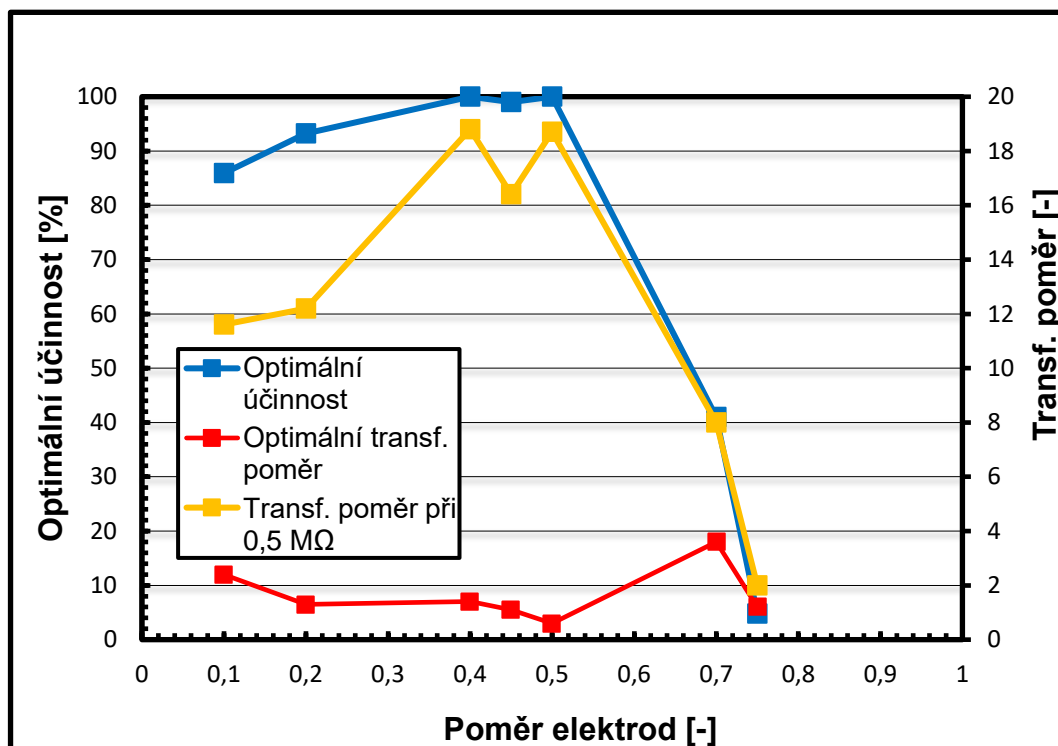
$$P_{in} = |U_{in}I_{in}\cos(2\pi f_r\Delta t)| \quad (21)$$

kde  $\Delta t$  je časový interval změřený na průbězích napětí a proudu v primárním obvodu v okamžiku nulového napětí a nulového proudu.

Postupně byly všechny vzorky zapojeny do obvodu a to tak, že obě svrchní elektrody byly postupně vstupními a výstupními. Na odporové dekádě byl postupně pro každý vzorek nastavován odpor 500; 200; 100; 50; 20; 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2; 0,1 k $\Omega$  a hodnoty napětí a proudu na vstupu a výstupu byly zaznamenávány do tabulky, stejně tak jako hodnoty fázového posunu v primárním obvodu. Z tabulek byly vytvořeny grafy pro účinnost a transformační poměr, které je možné nalézt v příloze.

Následně byl vytvořen graf hodnot optimální účinnosti a optimálního transformačního poměru (tj. transformační poměr při optimální účinnosti). Do tohoto grafu byly zaneseny hodnoty transformačního poměru naprázdno, což je transformační poměr při velmi velkém odporu, v tomto případě 0,5 M $\Omega$ . Viz graf č. 3 pro hodnoty módu kmitu  $k'_{31}$  a graf č. 4 pro

hodnoty vyšší harmonické frekvence k módu kmitu  $k_{31}$ . Hodnoty veličin zanesených do grafů jsou k nalezení v tabulkách č. 5 a 6.



Graf č. 3

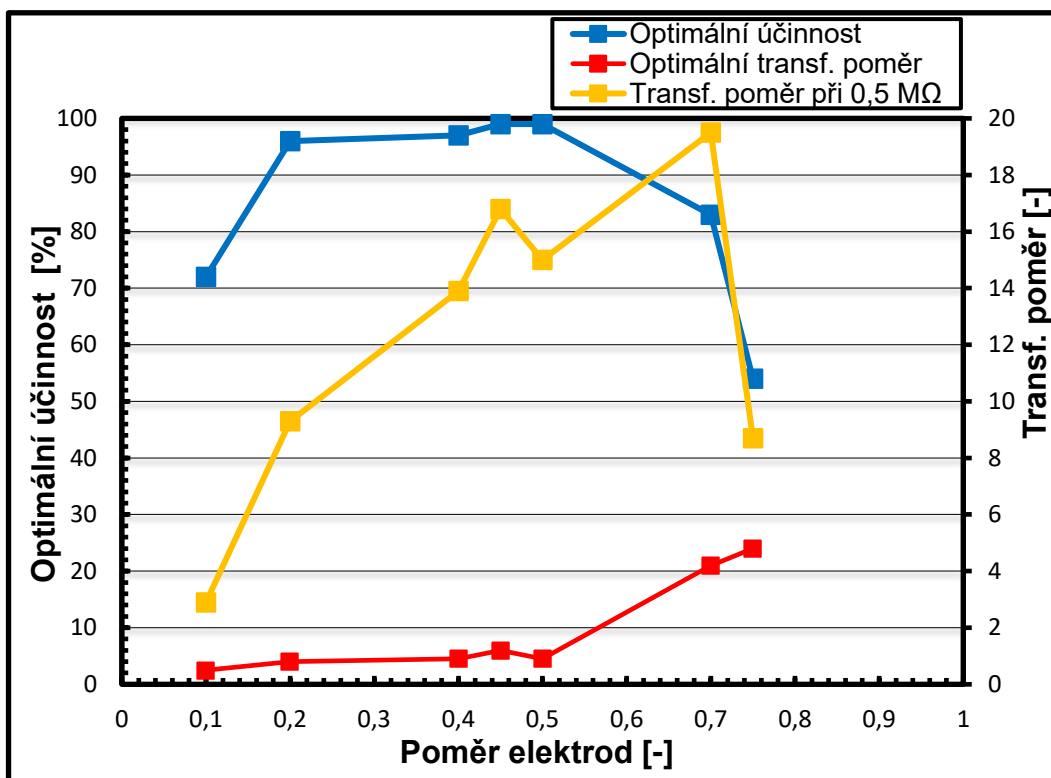
Graf závislosti hodnot optimální účinnosti na poměru šířky elektrod pro vyšší harmonickou frekvenci k módu kmitu  $k'_{31}$ .

Vzorek č.	$w_{in}$ [mm]	$w_{in}/w$ [-]	Opt. účinnost [%]	Opt. zesílení [-]	Opt. zátěž [kΩ]	zesílení naprázdno [-]
#1	1	0,1	86	2,4	20	12
#2	2	0,2	93	1,3	5	12
#3	4	0,4	100	1,4	2	19
#4	4,5	0,45	99	1,1	1	16
#3	5	0,5	100	0,6	1	19
#2	7	0,7	41	3,6	2	8
#1	7,5	0,75	5	1,2	2	2

Tabulka č. 5

Hodnoty optimálních účinností, zesílení, zátěže a zesílení naprázdno pro mód kmitu  $k'_{31}$ .





Graf č. 4

Graf závislosti hodnot optimální účinnosti na poměru šířky elektrod pro vyšší harmonickou frekvenci kmitu  $k$  módu  $k_{31}$ .

Vzorek č.	$w_{in}$ [-]	$w_{in}/w$ [-]	Opt. účinnost [%]	Opt. zesílení [-]	Opt. zátěž [kΩ]	zesílení naprázdno [-]
#1	1	0,1	72	0,5	2	3
#2	2	0,2	96	0,8	2	9
#3	4	0,4	97	0,9	1	14
#4	4,5	0,45	99	1,2	1	17
#3	5	0,5	99	0,9	1	15
#2	7	0,7	83	4,2	2	20
#1	7,5	0,75	54	4,8	2	9

Tabulka č. 6

Hodnoty optimálních účinností, zesílení a zátěže a zesílení naprázdno pro vyšší harmonickou frekvenci módu  $k_{31}$ .

# Závěr

Práce je rozdělena do dvou částí – teoretické a praktické. První část je věnována piezoelektrickému jevu a piezoelektrickým keramikám. Dále je teoretická část zaměřena na teorii piezoelektrických transformátorů a veličiny, jimiž jsou piezoelektrické transformátory popisovány. Veličiny byly popsány a popřípadě u nich byly uvedeny vzorce pro výpočet hodnoty.

V praktické části byly veličiny popisující všech pět vzorků piezoelektrické keramiky proměřeny a dopočítány. Výsledné hodnoty byly vloženy do tabulek, nebo, bylo-li to vhodnější, do grafů. Dále byly vyrobeny čtyři piezoelektrické transformátory, jeden vzorek byl ponechán jako rezerva, a postup pro jejich výrobu byl zdokumentován a vložen do samostatné kapitoly. Protože byl koeficient elektromechanické vazby  $k'_{31}$  (frekvence okolo 185 kHz) větší než koeficient  $k_{31}$  (frekvence okolo 175 kHz), byl vybrán mód pro  $k'_{31}$  jako hlavní proměřovaný mód kmitu. Čím větší je koeficient elektromechanické vazby, tím větší bude transformační poměr. Zároveň byla také proměřována vyšší harmonická frekvence kmitu k módu  $k_{31}$ . Pro tyto dva módy kmitu byly naměřeny závislosti transformačního poměru a účinnosti na poměru šířek elektrod. Z těchto hodnot byly následně sestaveny grafy závislosti optimálních transformačních poměrů, účinností, a navíc transformačních poměrů při zapojení naprázdno na poměru velikosti elektrod. Zároveň byly vytvořeny tabulky těchto hodnot, do kterých byly navíc vloženy hodnoty optimálních zátěží v sekundárním obvodu.

Z naměřených hodnot vychází, že mód kmitu  $k'_{31}$  je nejvhodnější pro transformaci, protože hodnoty účinnosti se blíží 100 %, a to pro poměry elektrod 0,4; 0,45; 0,5 s transformačními poměry 1,4; 1,1; 0,6 a při zátěži 2 k $\Omega$ ; 1 k $\Omega$ ; 1 k $\Omega$ . Navíc je mód kmitu  $k'_{31}$  vhodnější i pro praktické využití, protože transformátor při tomto módu kmitu lze připevnit za podélnou hranu.

Pro harmonickou frekvenci kmitu k módu  $k_{31}$  je pro poměry elektrod 0,45 a 0,5; při zátěži 1 k $\Omega$  transformační poměr 1,2 a 0,9; a to při účinnosti 99 %.

Grafy hodnot měření jsou umístěny v příloze a rozděleny podle jednotlivých vzorků.

# Zdroje

## Internetové odkazy

Elektrická indukce. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1\\_indukce](https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1_indukce)

*Encyklopedie fyziky: \*\*\*Elektrická indukce* [online]. Encyklopedie fyziky, 2006 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/230-elektricka-indukce>

ERHART, Jiří. Piezoelektrina a další elektromechanické jevy I. *Třípól* [online]. Tábor: Simopt, 2014, 22. 6. 2009 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/astronomie/40-piezoelektrina-a-dalsi-elektromechanicke-jevy-i>

GLOSSARY & SYMBOL USAGE. *Piezo systems* [online]. Woburn [cit. 2018-02-08]. Dostupné z: <http://www.piezo.com/tech6glossary.html>

Impedance. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Impedance>

Měření odporu. *Wikiskripta* [online]. 15. 2. 2018 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD\\_odporu](https://www.wikiskripta.eu/w/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD_odporu)

Modul pružnosti v tahu. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Modul\\_pružnosti\\_v\\_tahu](https://cs.wikipedia.org/wiki/Modul_pružnosti_v_tahu)

Piezoelectric constants. *American Piezo International Ltd.* [online]. 2016 [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>

Piezoelektrické jevy: Základy piezoelektrických jevů a jejich aplikace v moderních technologiích. *České vysoké učení technické fakulta strojní ústav fyziky* [online]. Praha: neuvedeno, neuveden [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: [http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT\\_11.pdf](http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf)

Rezonance. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Rezonance>

Rezonanční obvod. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Rezonan%C4%8Dn%C3%AD\\_obvod](https://cs.wikipedia.org/wiki/Rezonan%C4%8Dn%C3%AD_obvod)

Skripta: Měření proudu a napětí. *Katedra fyziky povrchů a plazmatu* [online]. Praha, 16. 10. 2014 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap4/4\\_1.html](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap4/4_1.html)

Skripta: Piezoelektrické snímače. *Virtuální laboratoř - Měření: Měření snímače, metody* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně Fakulta strojního inženýrství, 2003 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/ka03-05.htm>

Skripta: Vztah mezi napětím a deformací, elastické látky. *Katedra fyziky povrchů a plazmatu* [online]. Praha, 10. 3. 2008 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/kontinuum/2\\_1](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_1)

## Vědecké práce

FIALKA, Jiří. *Měření parametrů piezoelektrických aktivních prvků snímačů akustické emise* [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=110002](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=110002).

Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Beneš Ph.D.

HANUS, Jiří. Využití piezo-materiálu pro získávání elektrické energie z vibrací. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

KOUKOLÍK, Václav. *Využití piezoelektrického jevu v praxi* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2017-12-29]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/10094/1/DIPLOMKA.pdf>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.

KUČERA, David. *Koncepce tlačítkového piezo-generátoru* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=54121](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54121). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

MAŠEK, Stanislav Josef. *Piezoelektrické transformátory*. Plzeň, 2017. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Václav Koucký, CSc.

PASTOREK, Lukáš. *Využití energie piezoelektrického jevu* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2018-01-27]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/2274/1/Piezoelektricky%20dej.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Jan Beneš.

## **Tištěné publikace**

ČERMÁK, František, Dobroslav ČERNOHLÁVEK, Jindřich HIRŠL a Oto STEFAN. *Keramická piezoelektrika: Vlastnosti a technické použití*. Praha: Tesla - Výzkumný ústav pro sdělovací techniku A. S. Popova, 1970.

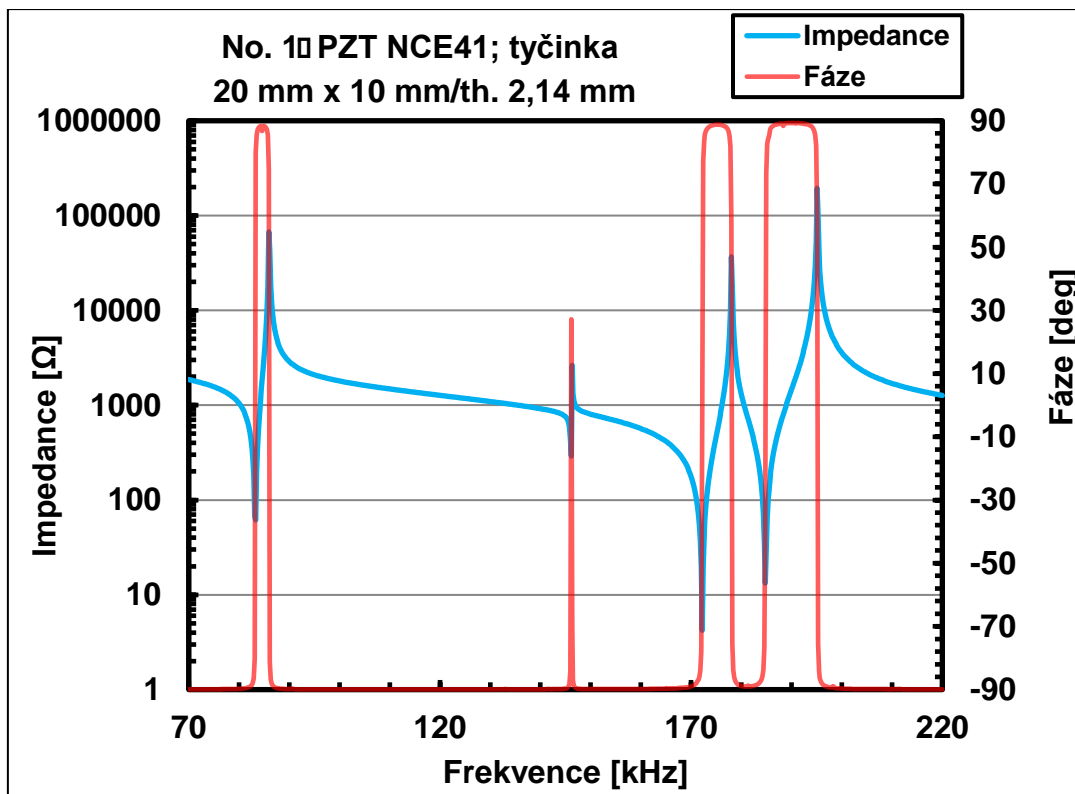
ERHART, Jiří, Petr PŮLPÁN a Martin PUSTKA. *Piezoelectric ceramic resonators*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-42480-4.

PŮLPÁN, Petr a Jiří ERHART. Piezoelektrické transformátory. *Elektro*. 2006, (1), 5.

## **Přílohy**

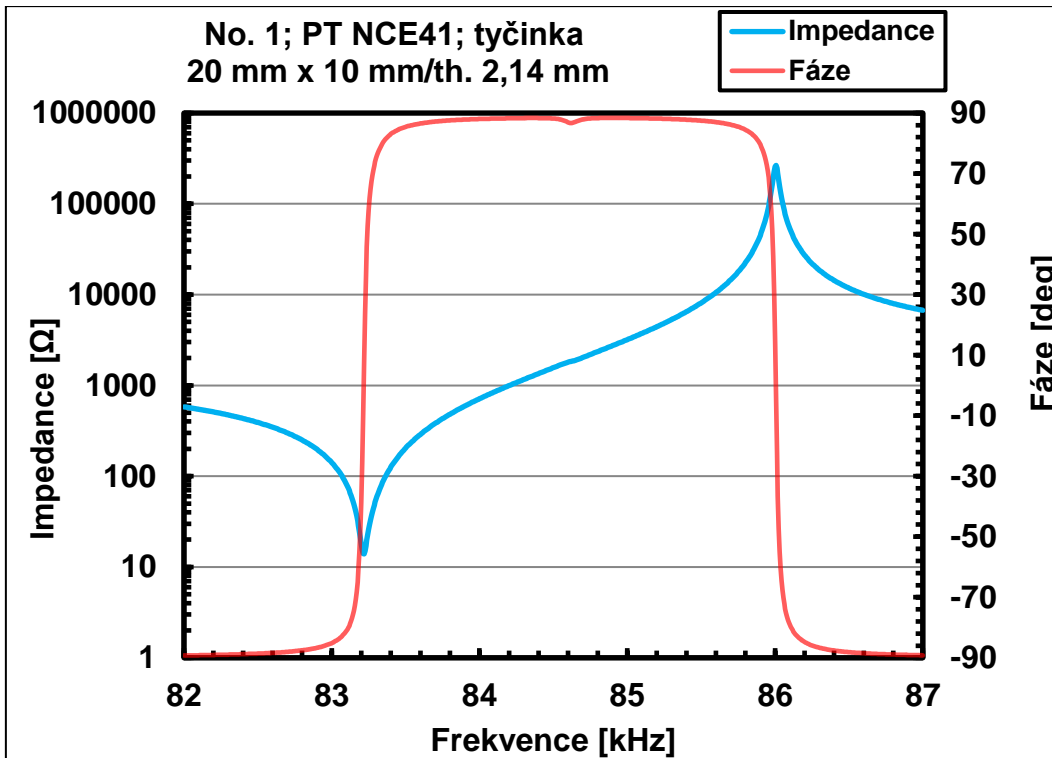
## Grafy měřených hodnot vzorků:

### Vzorek #1



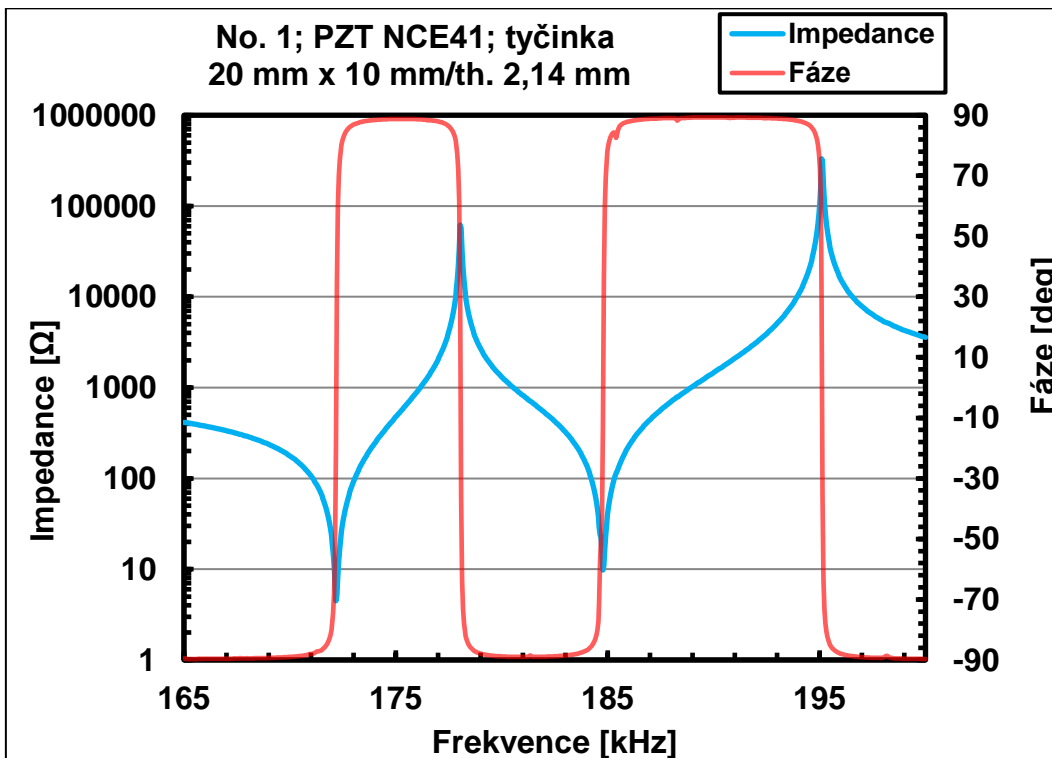
Graf č. 5

Graf závislosti impedance na frekvenci. U frekvence kolem 85 kHz se nachází mód kmitu  $k_{31}$ . A u frekvence kolem 185 kHz se nachází mód kmitu  $k'_{31}$ , který vazbí s harmonickým módem kmitu ke  $k_{31}$ .



Graf č. 6

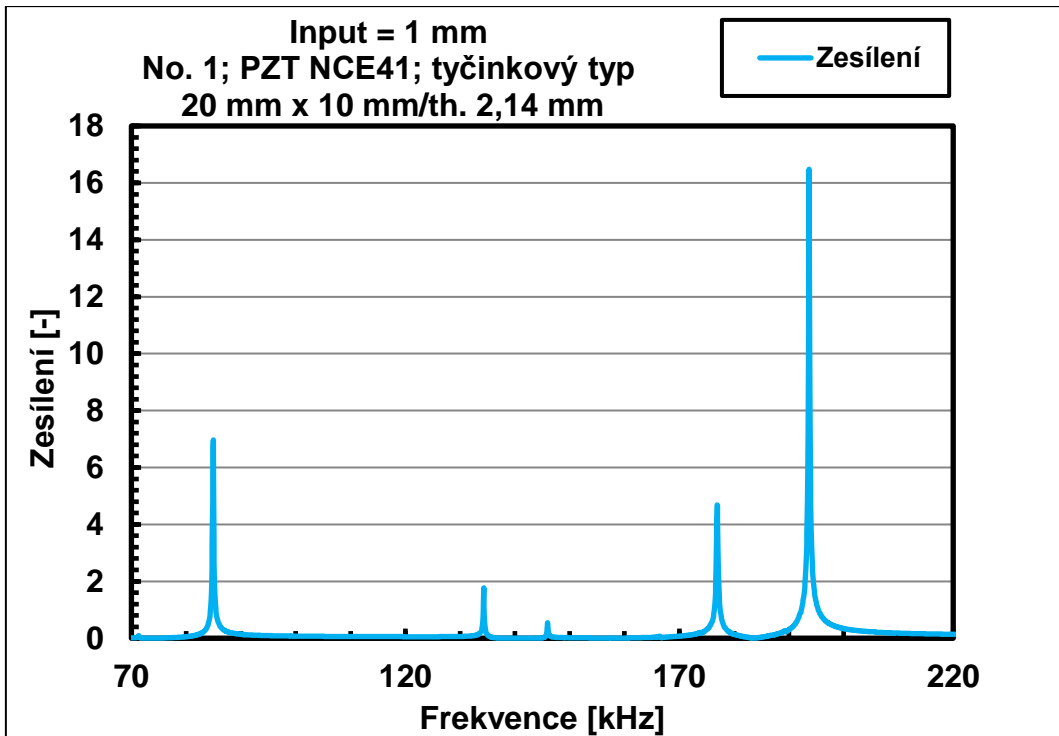
Detail grafu pro frekvence okolo 85 kHz, kde se nachází mód  $k_{31}$ .



Graf č. 7

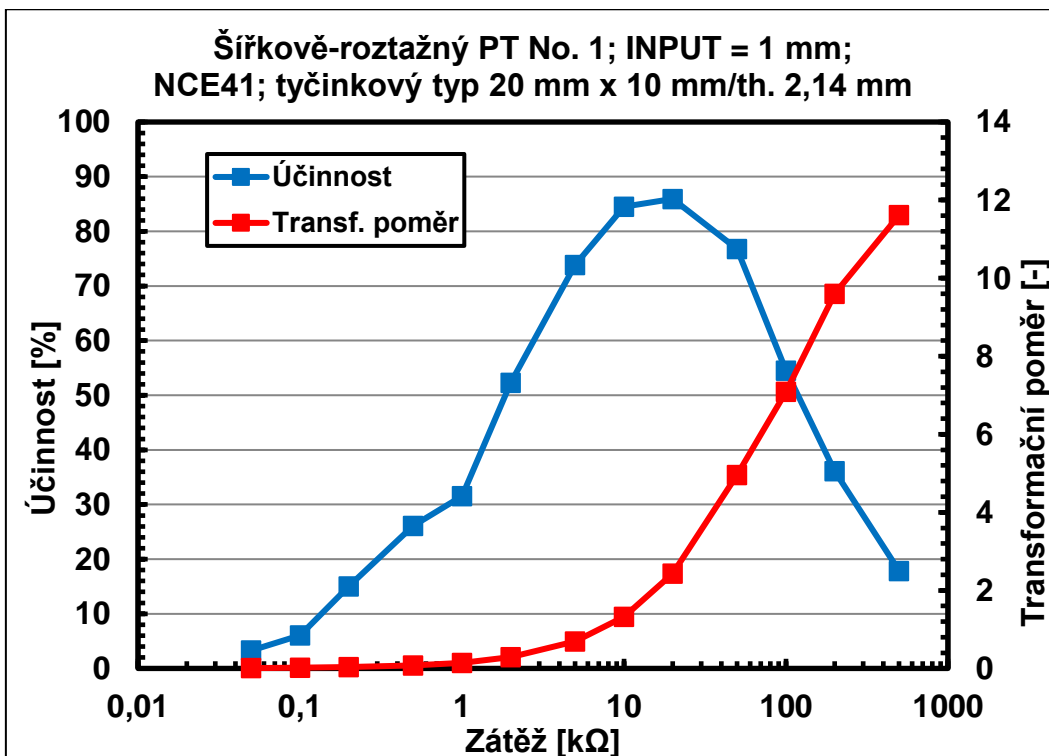
Detail grafu pro frekvence okolo 185 kHz, kde se nachází mód  $k'_{31}$ . První mód kmitu je harmonický k módu kmitu  $k_{31}$ .





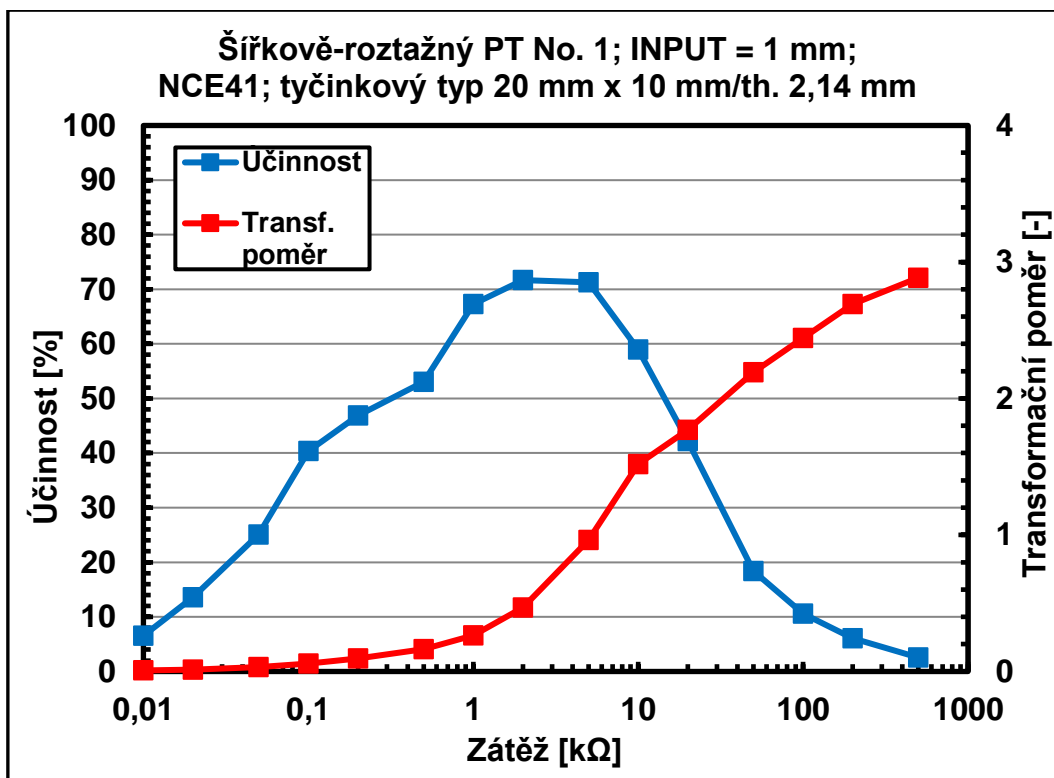
Graf č. 8

Graf zesílení napětí naprázdno pro transformátor se vstupní elektrodou šířky 1 mm.



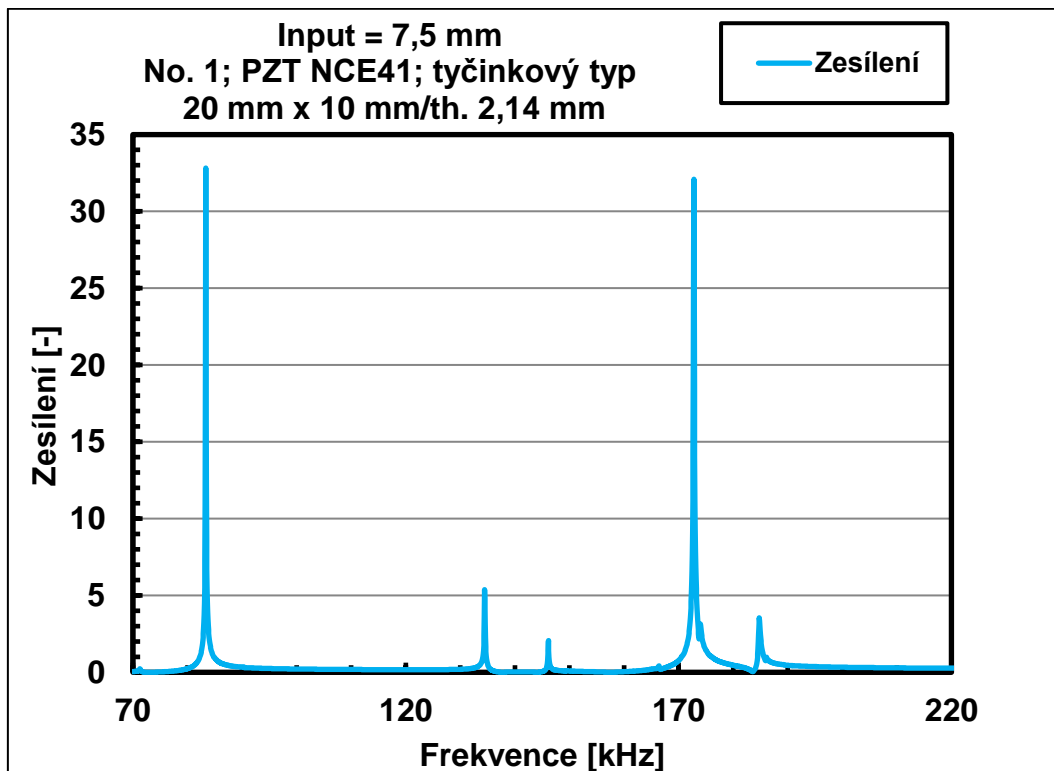
Graf č. 9

Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro mód kmitu  $k'_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 1 mm. Hodnoty pro odpor menší než 50  $\Omega$  se nepodařilo na osciloskopu proměřit.



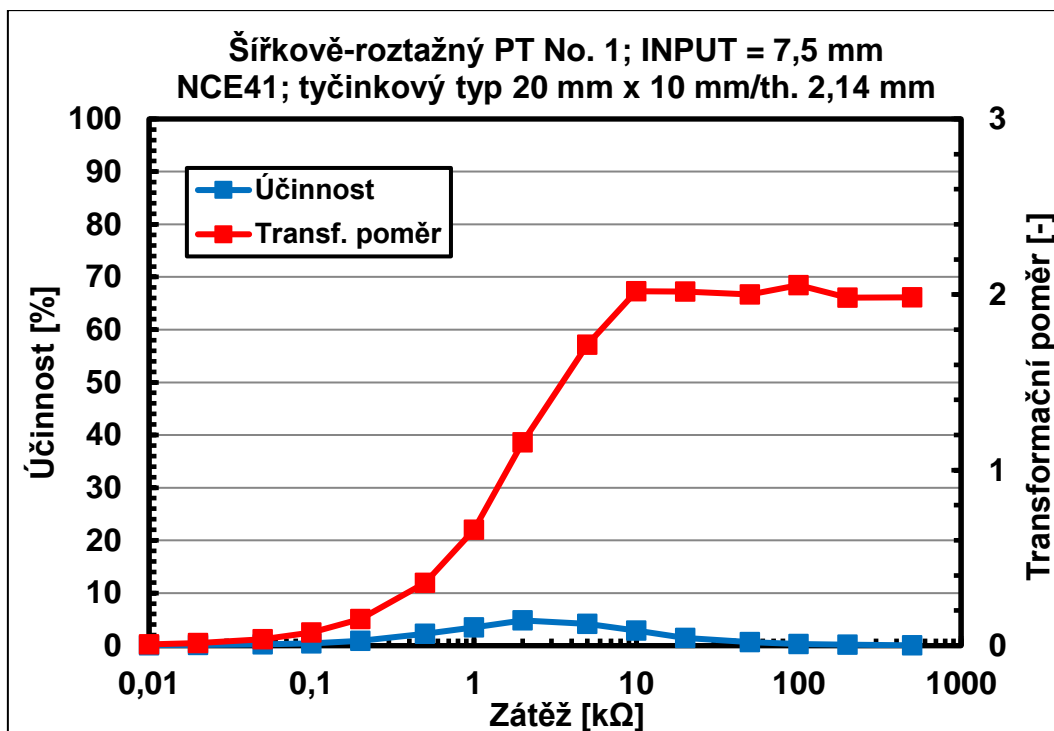
Graf č. 10

Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro harmonický mód k módu kmitu  $k_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 1 mm.



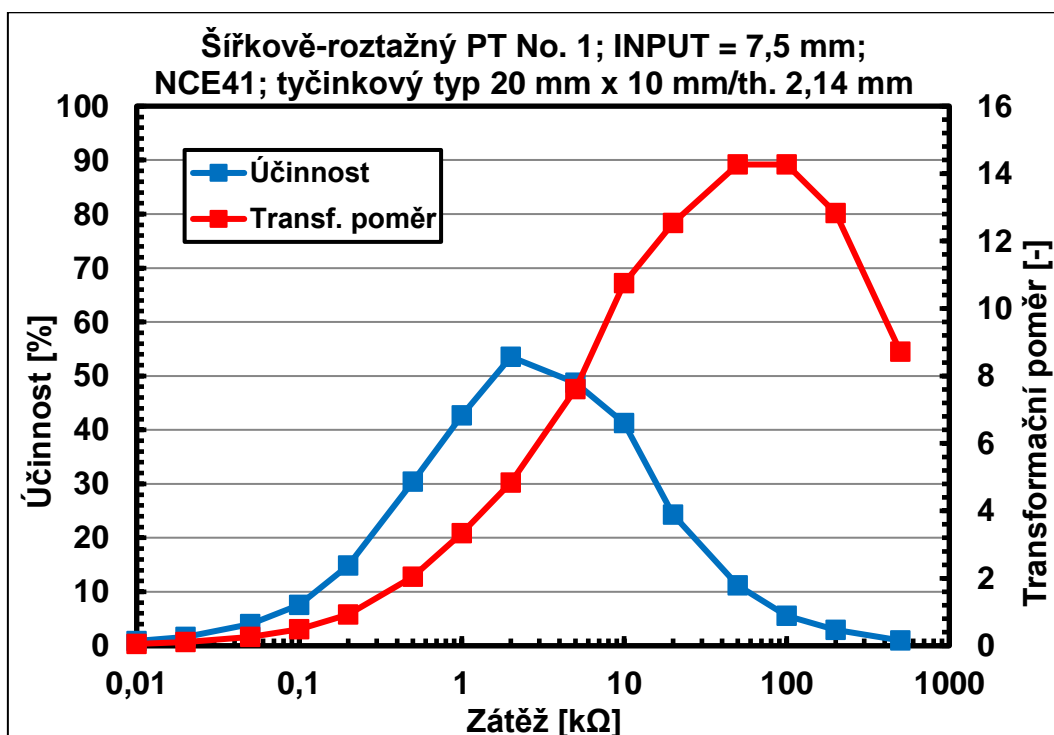
Graf č. 11

Graf zesílení napětí naprázdno pro transformátor se vstupní elektrodou šířky 7,5 mm.



Graf č. 12

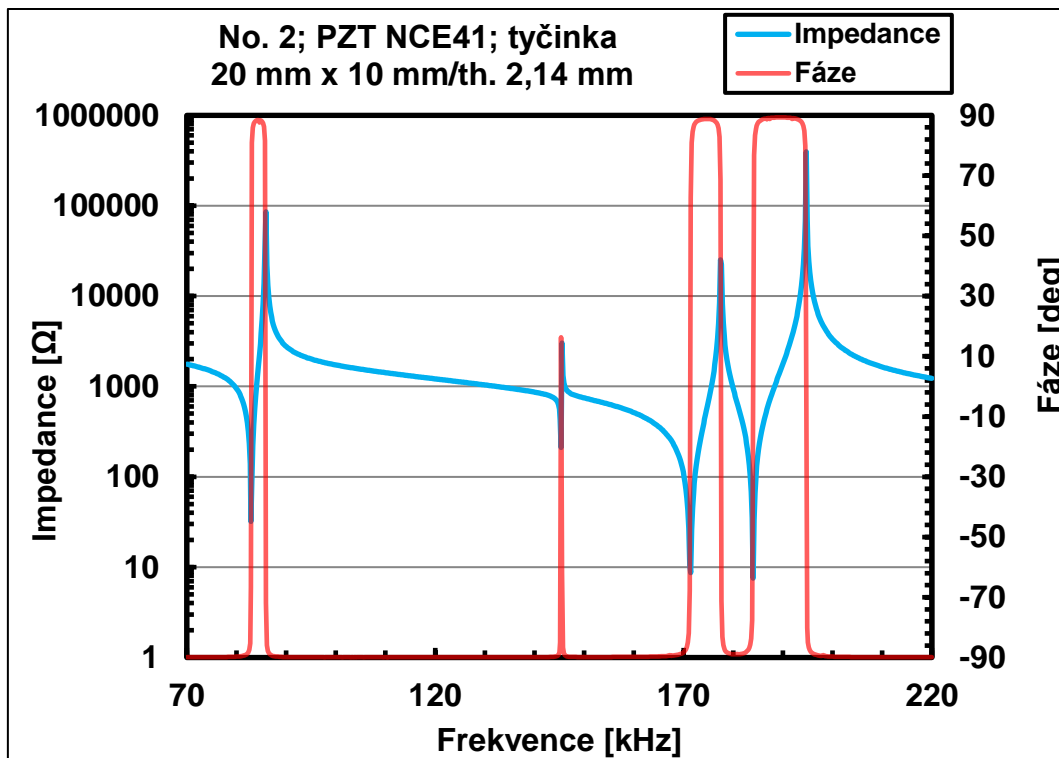
Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro mód kmitu  $k'_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 7,5 mm.



Graf č. 13

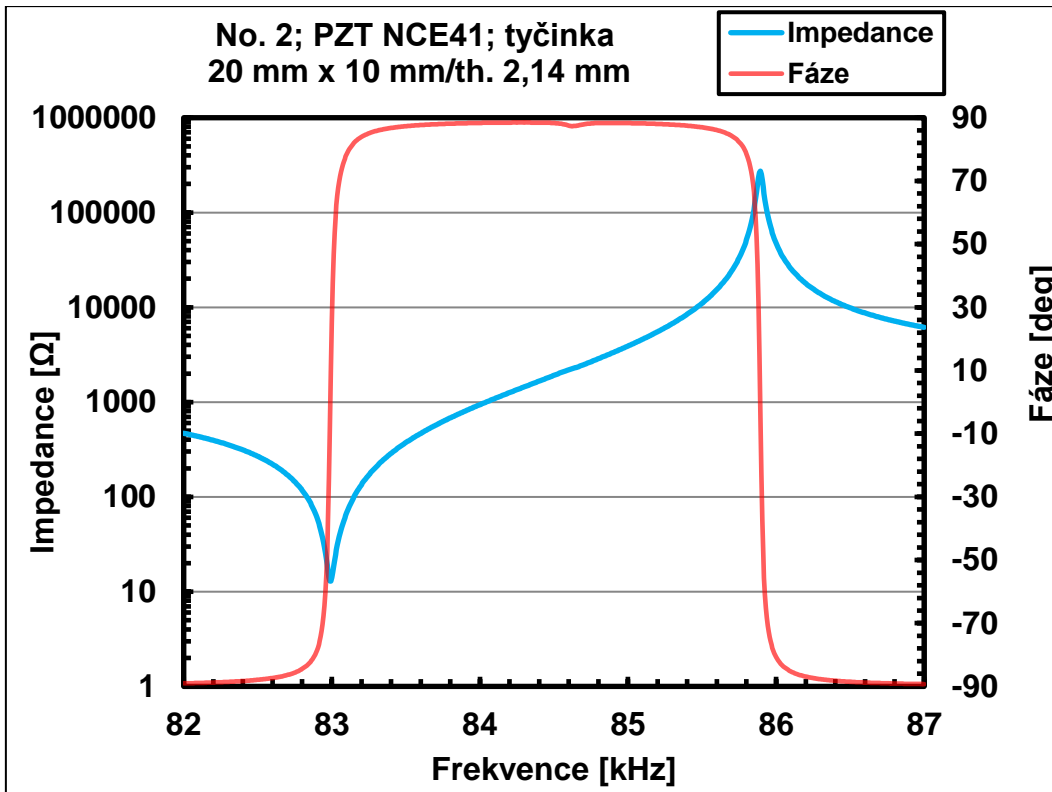
Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro harmonický mód k módu kmitu  $k_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 7,5 mm.

## Vzorek #2



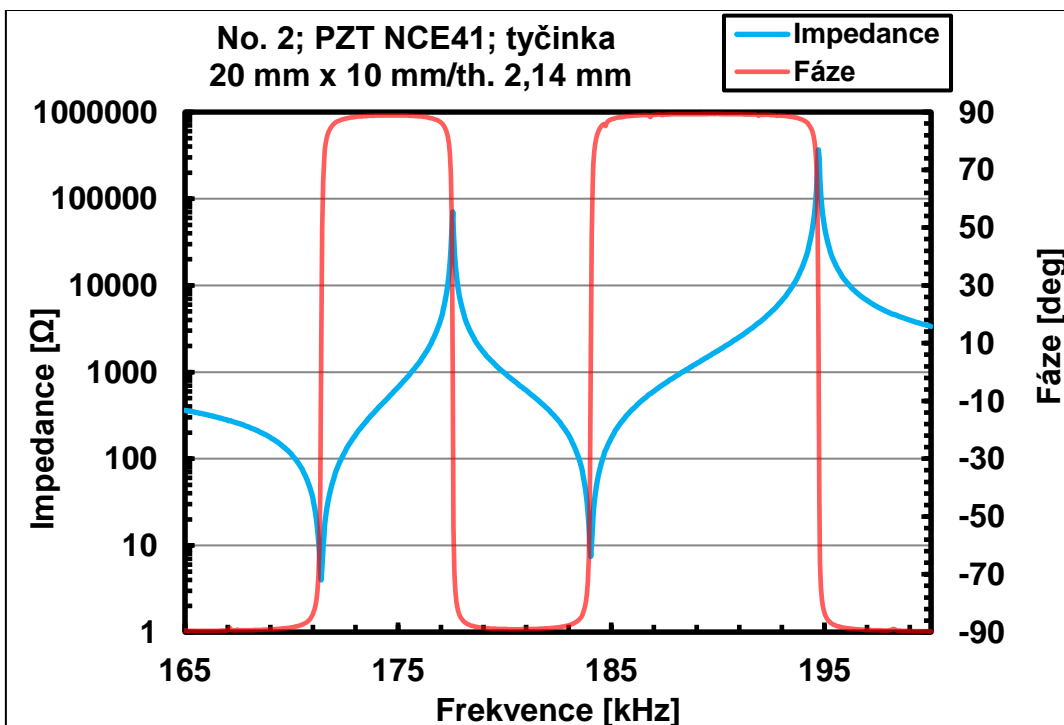
Graf č. 14

Graf závislosti impedance na frekvenci. U frekvence kolem 85 kHz se nachází mód kmitu  $k_{31}$ . A u frekvence kolem 185 kHz se nachází mód kmitu  $k'_{31}$ , který vazbí s harmonickým módem kmitu ke  $k_{31}$ .



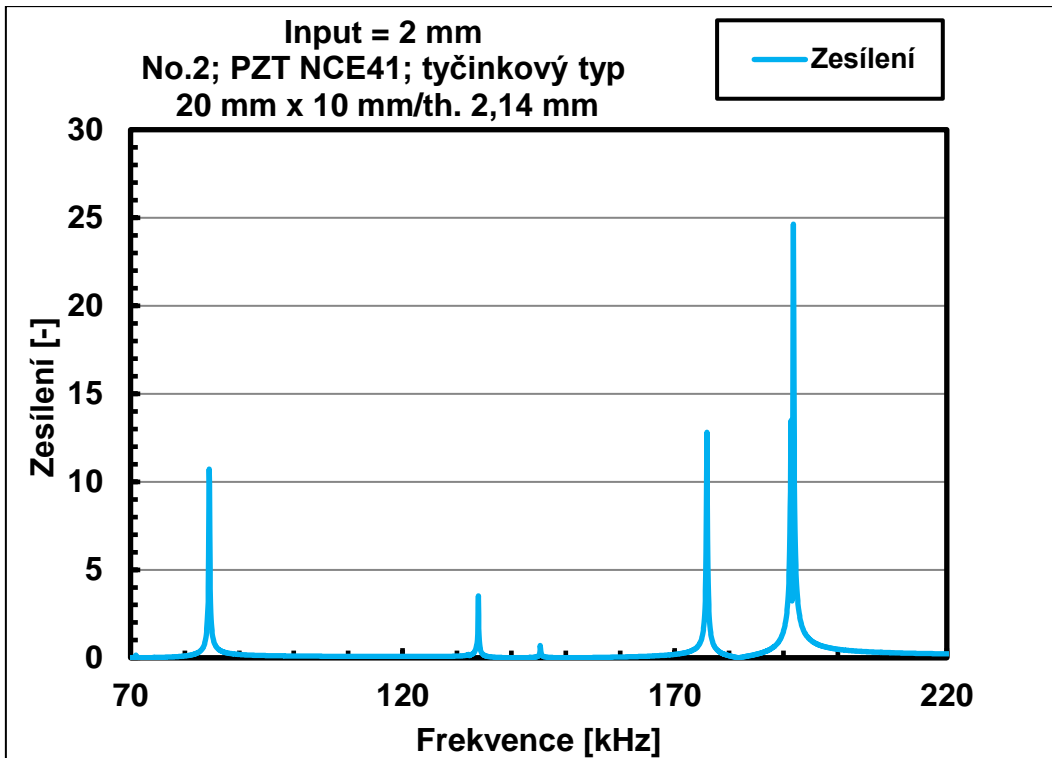
Graf č. 15

Detail grafu pro frekvence okolo 85 kHz, kde se nachází mód  $k_{31}$ .



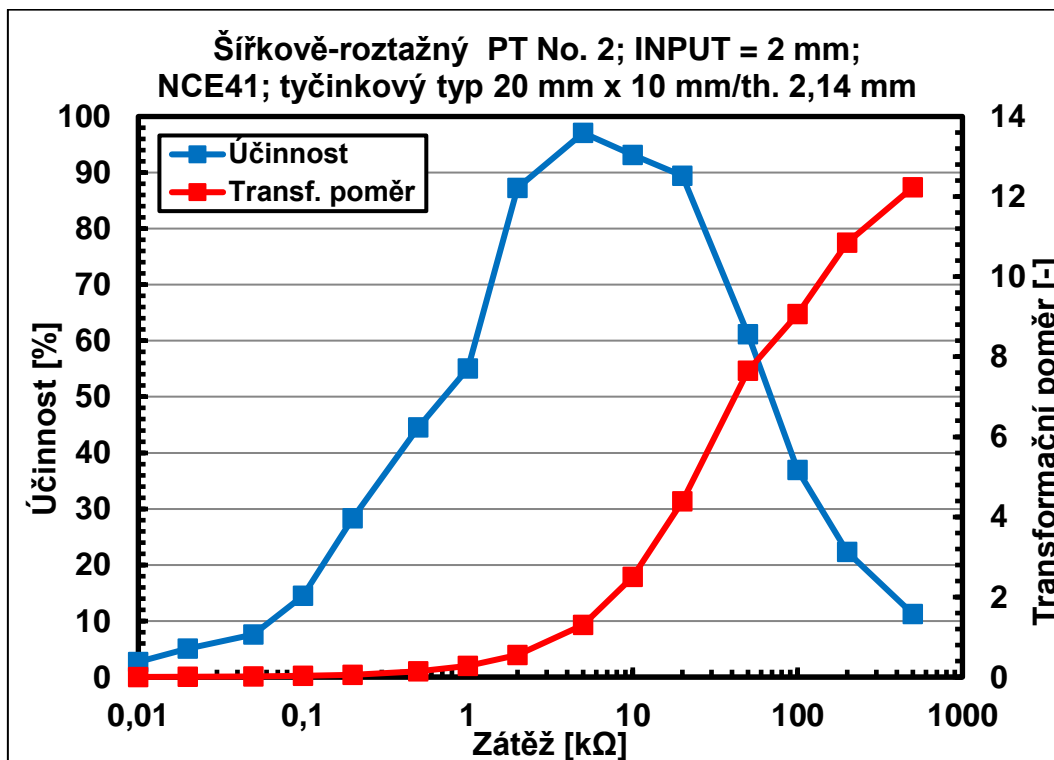
Graf č. 16

Detail grafu pro frekvence okolo 185 kHz, kde se nachází mód  $k'_{31}$ . První mód kmitu je harmonický k módu kmitu  $k_{31}$ .



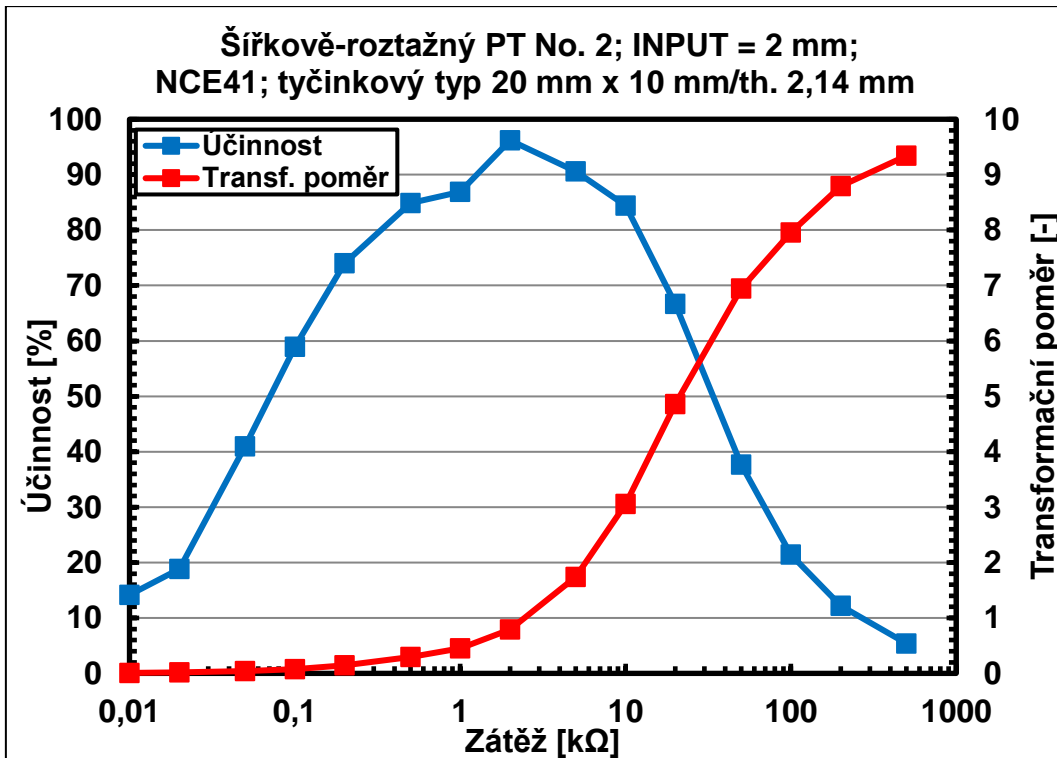
Graf č. 17

Graf zesílení napětí naprázdno pro transformátor se vstupní elektrodou šířky 2 mm.



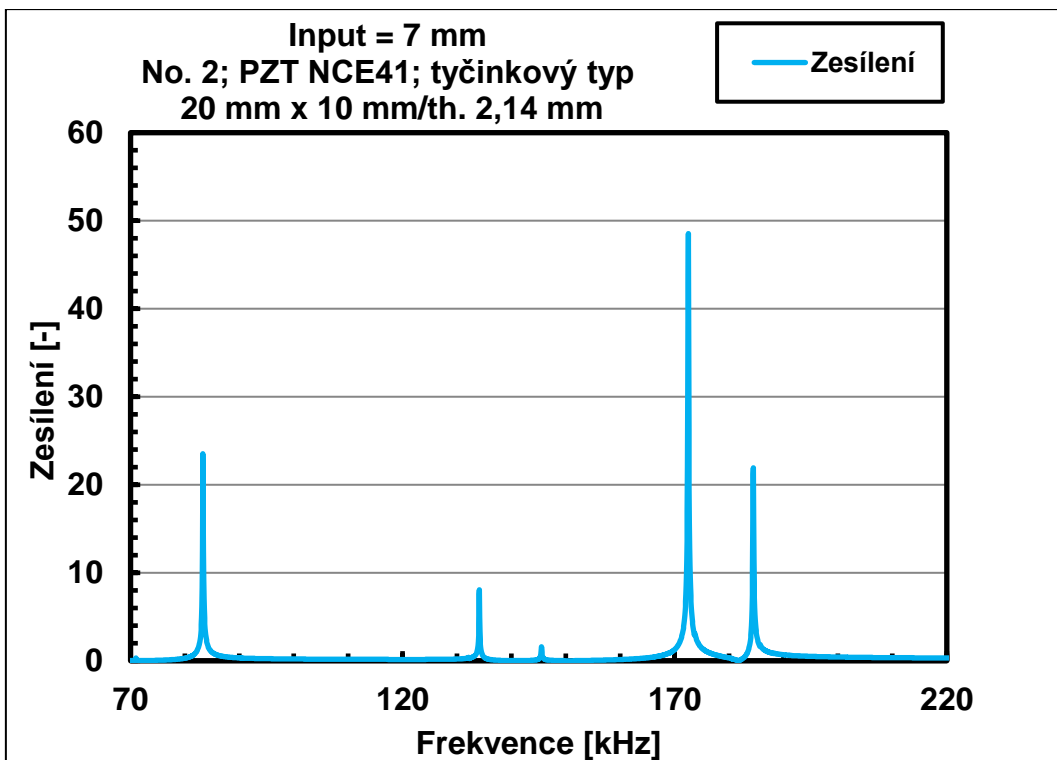
Graf č. 18

Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro mód kmitu  $k'_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 2 mm.



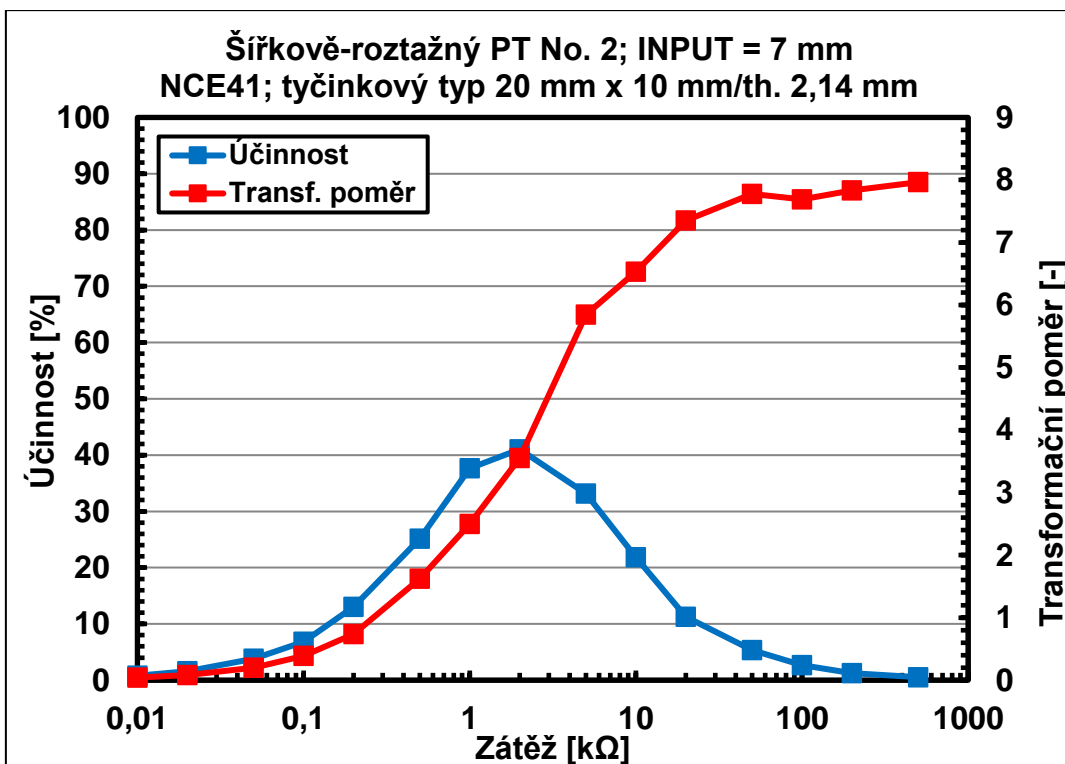
Graf č. 19

Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro harmonický mód k módu kmitu  $k_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 2 mm.

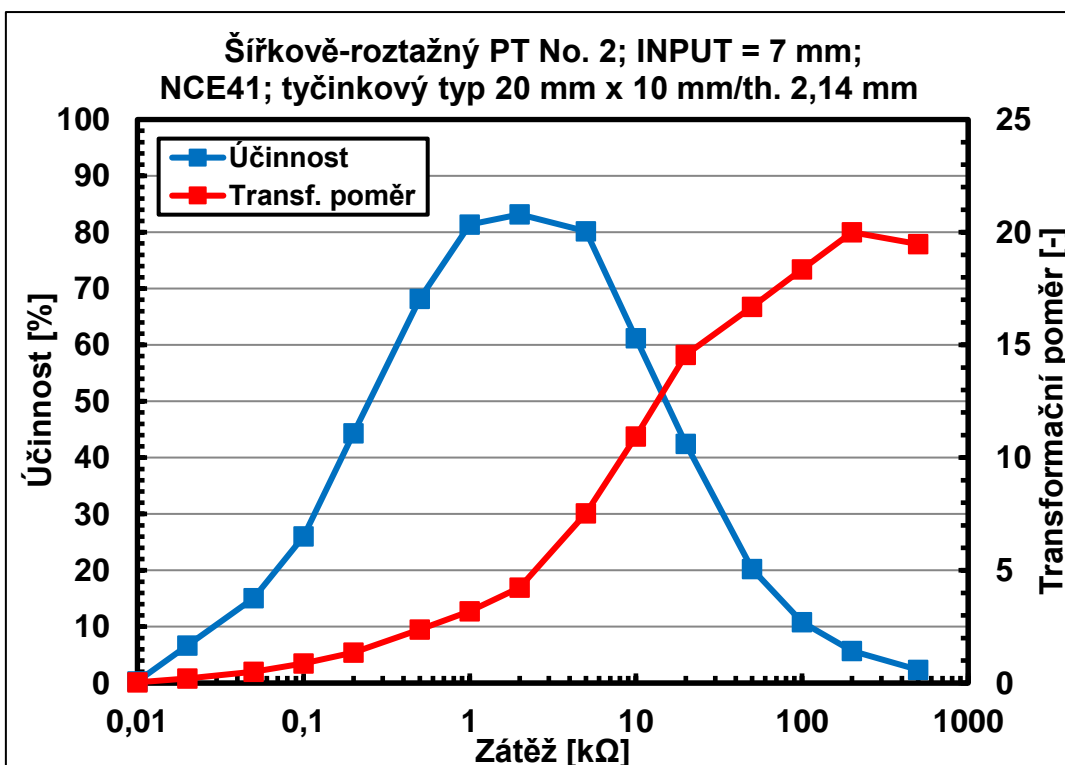


Graf č. 20

Graf zesílení napětí naprázdno pro transformátor se vstupní elektrodou šířky 7 mm.



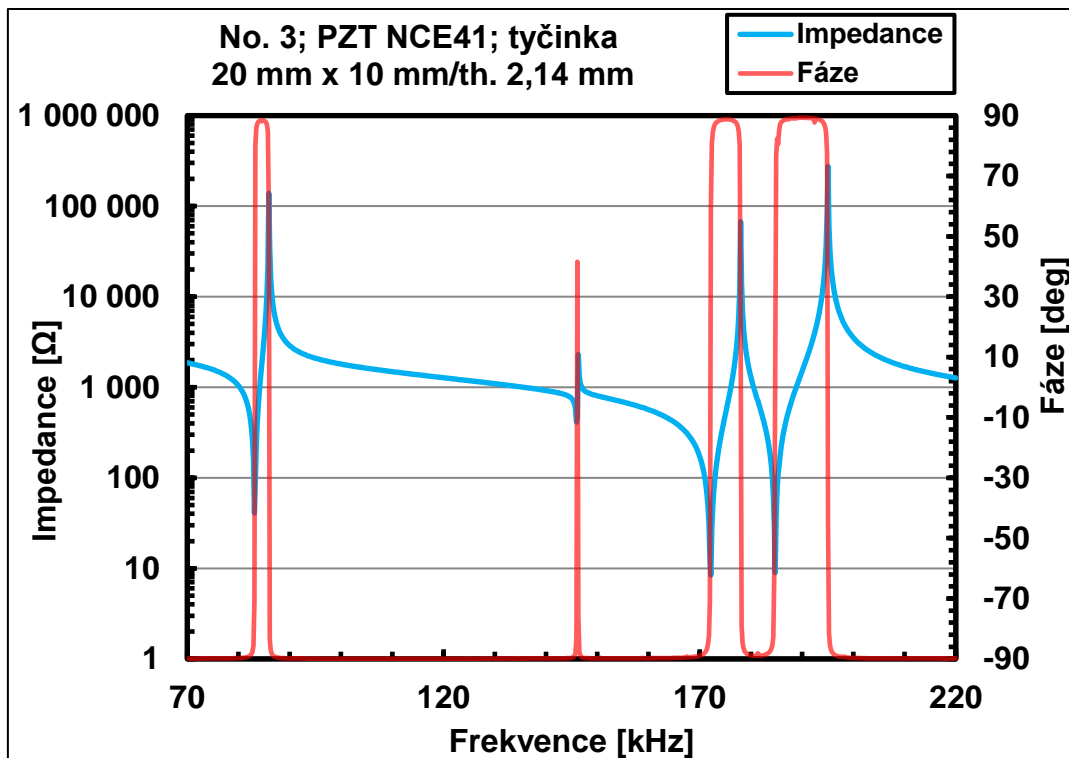
Graf č. 21  
Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro mód kmitu  $k'_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 7 mm.



Graf č. 22  
Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro harmonický mód k módu kmitu  $k_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 7 mm.

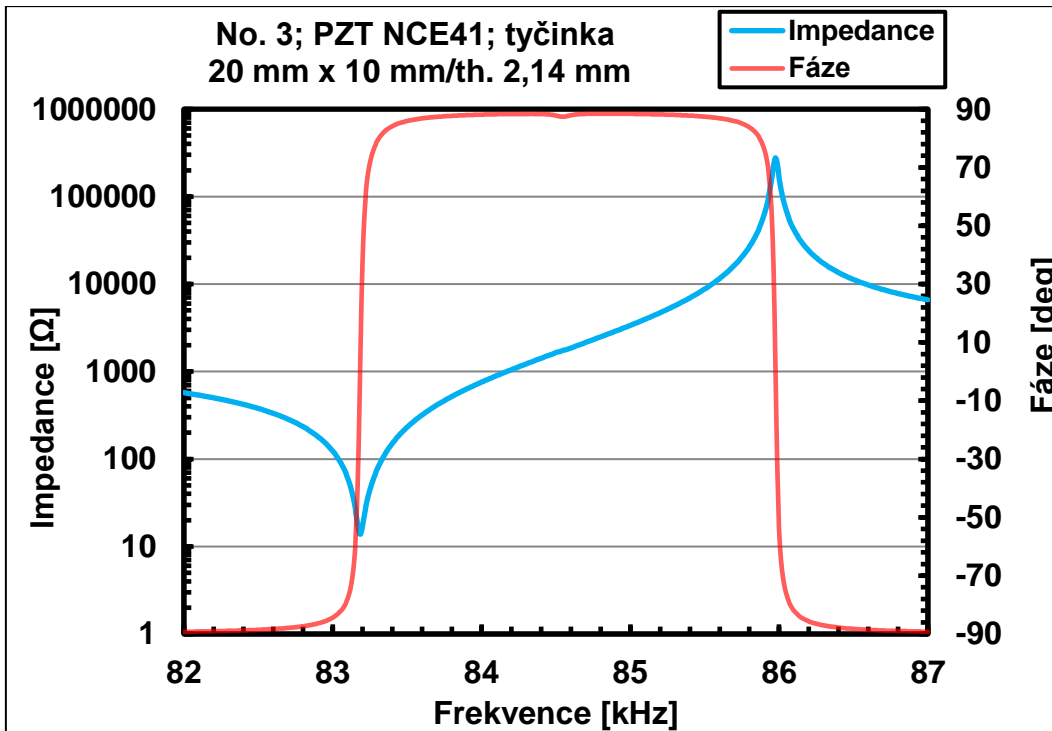


## Vzorek #3



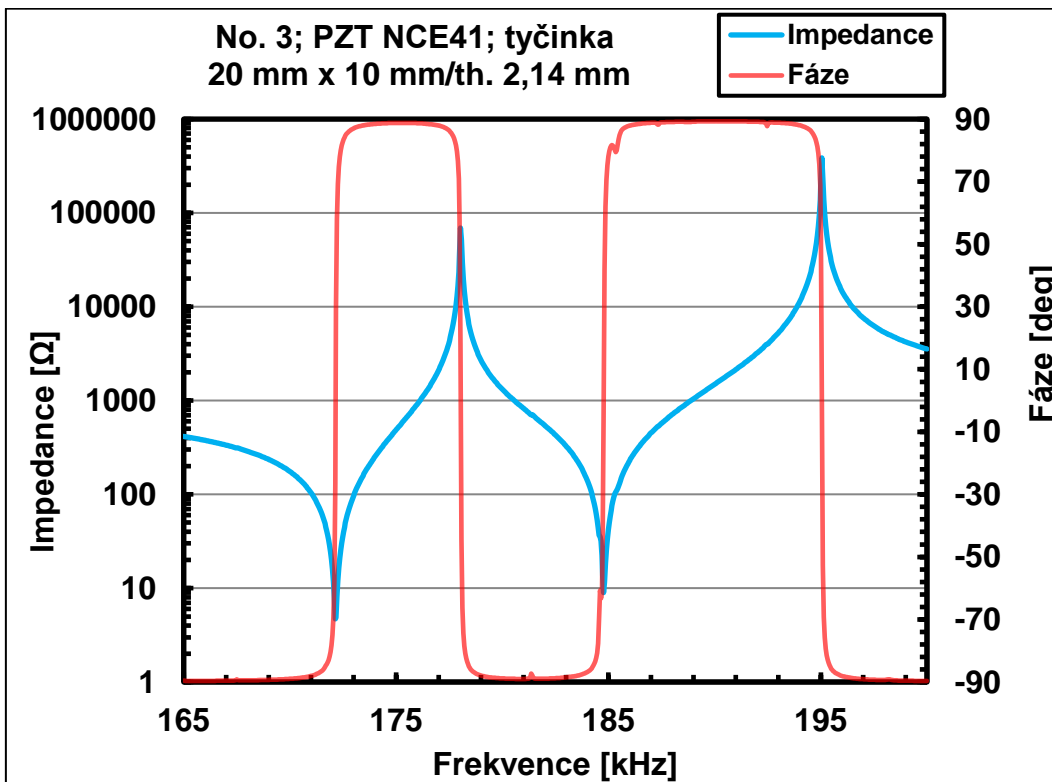
Graf č. 23

Graf závislosti impedance na frekvenci. U frekvence kolem 85 kHz se nachází mód kmitu  $k_{31}$ . A u frekvence kolem 185 kHz se nachází mód kmitu  $k'_{31}$ , který vazbí s harmonickým módem kmitu ke  $k_{31}$ .



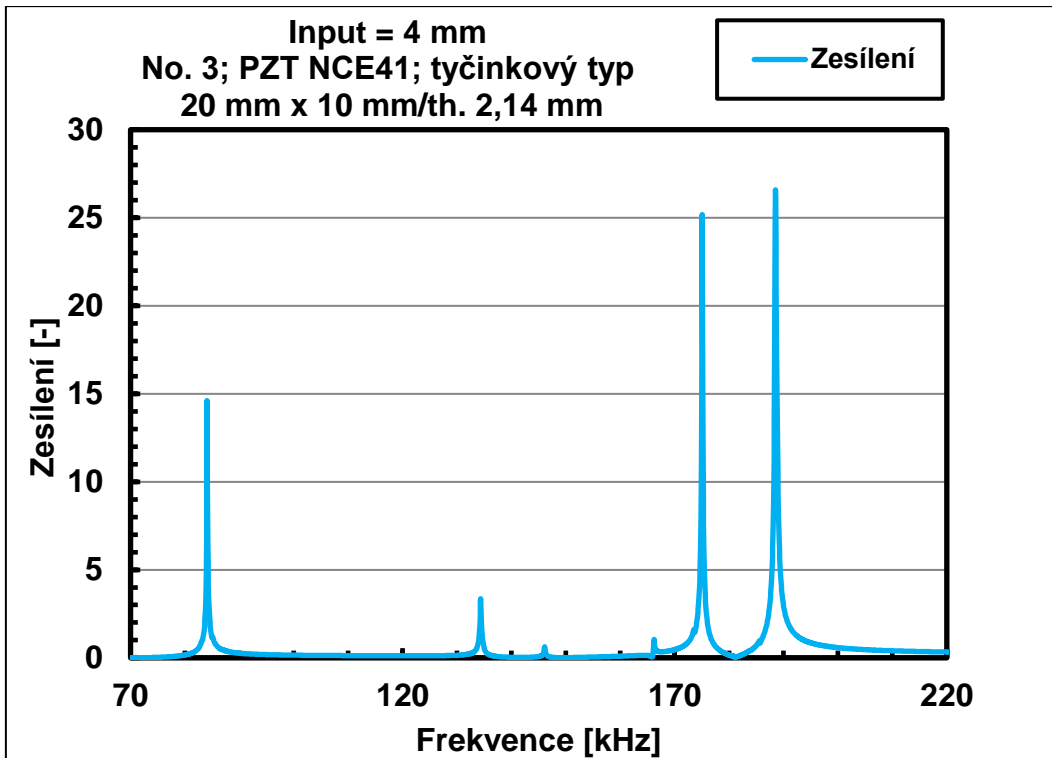
Graf č. 24

Detail grafu pro frekvence okolo 85 kHz, kde se nachází mód  $k_{31}$ .



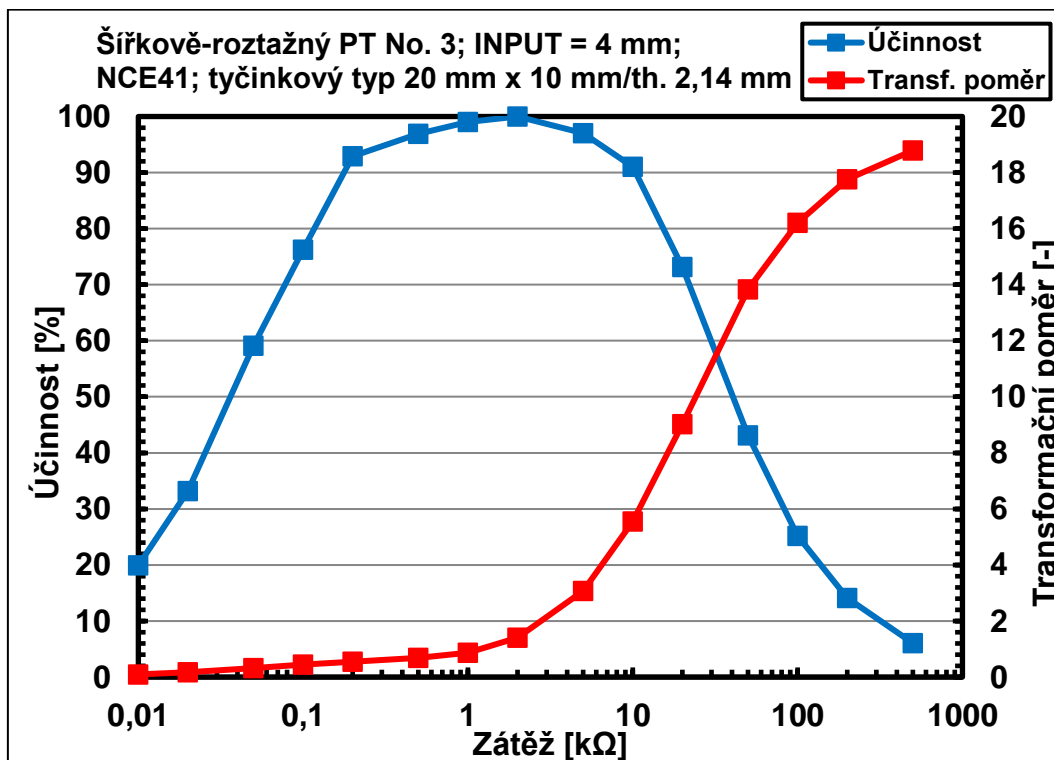
Graf č. 25

Detail grafu pro frekvence okolo 185 kHz, kde se nachází mód  $k'_{31}$ . První mód kmitu je harmonický k módu kmitu  $k_{31}$ .



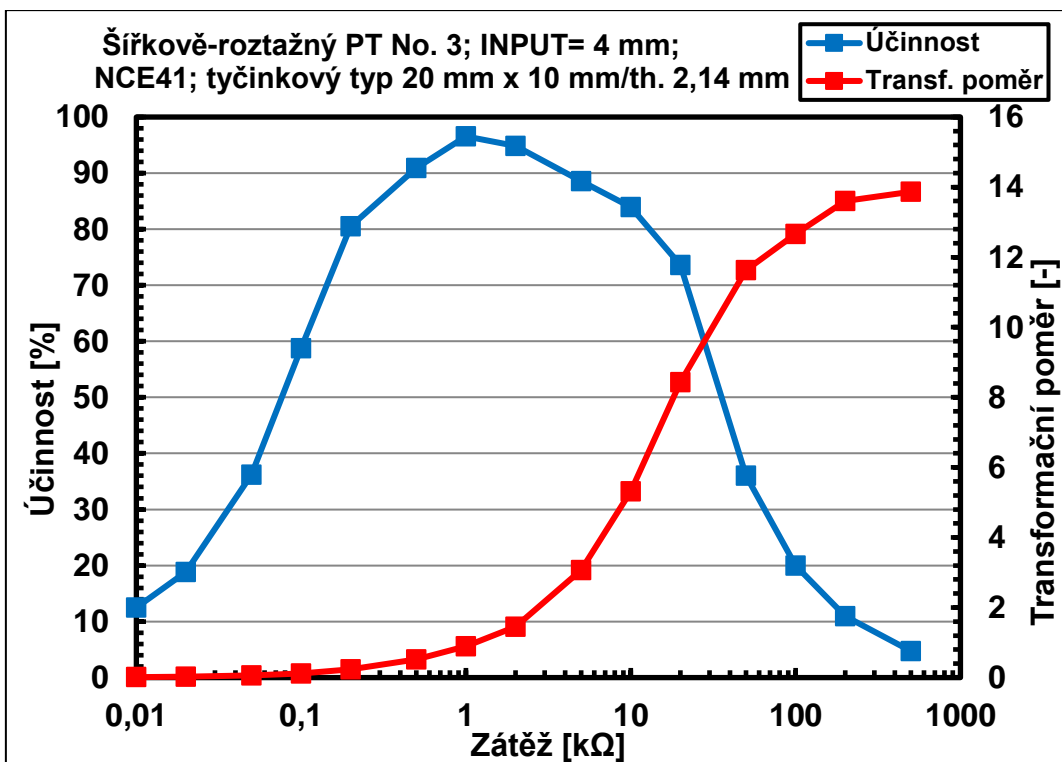
Graf č. 26

Graf zesílení napětí naprázdno pro transformátor se vstupní elektrodou šířky 4 mm.



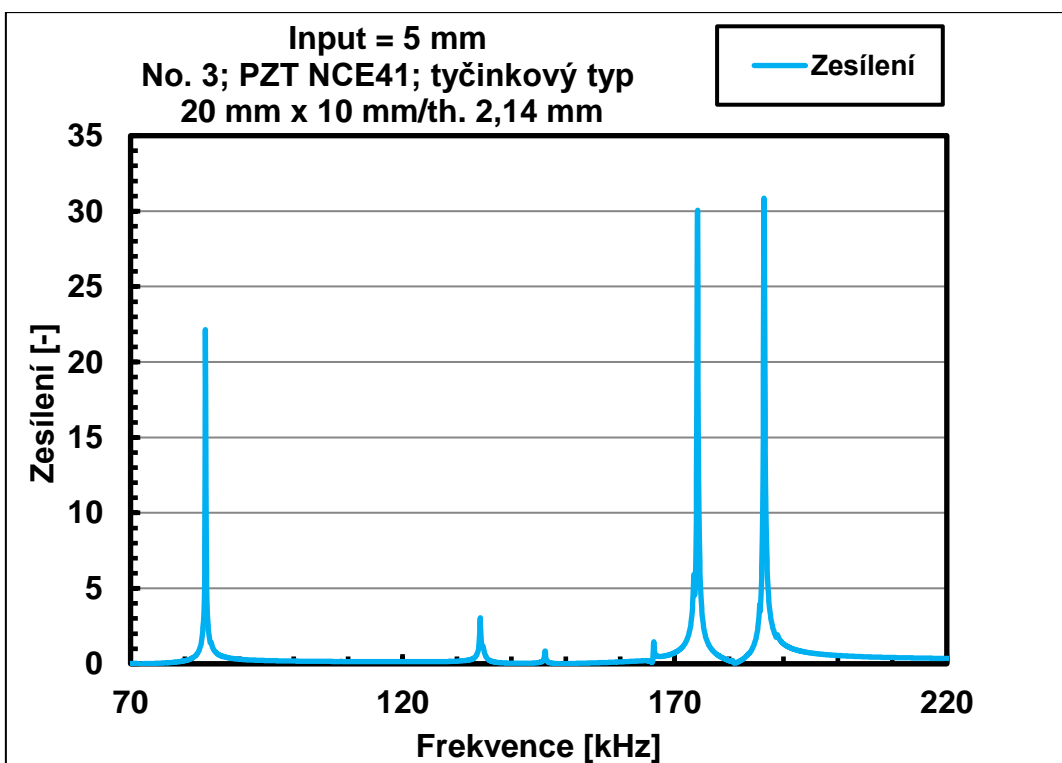
Graf č. 27

Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro mód kmitu  $k'_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 4 mm.



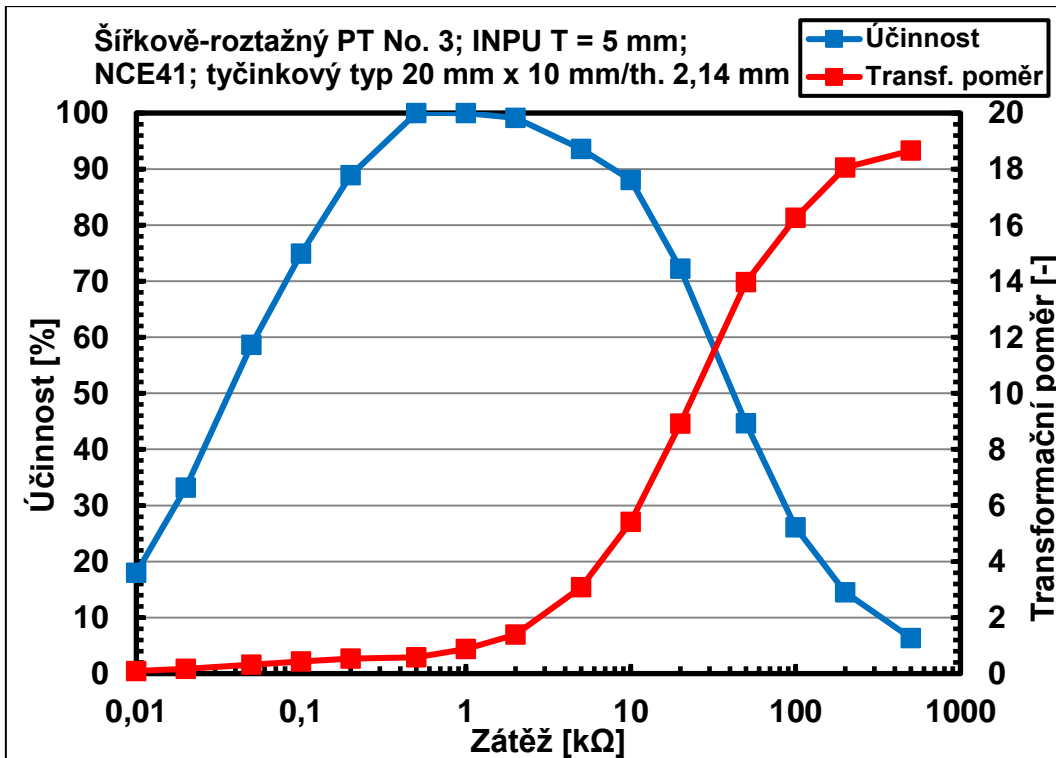
Graf č. 28

Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro harmonický mód k módu kmitu  $k_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 4 mm.



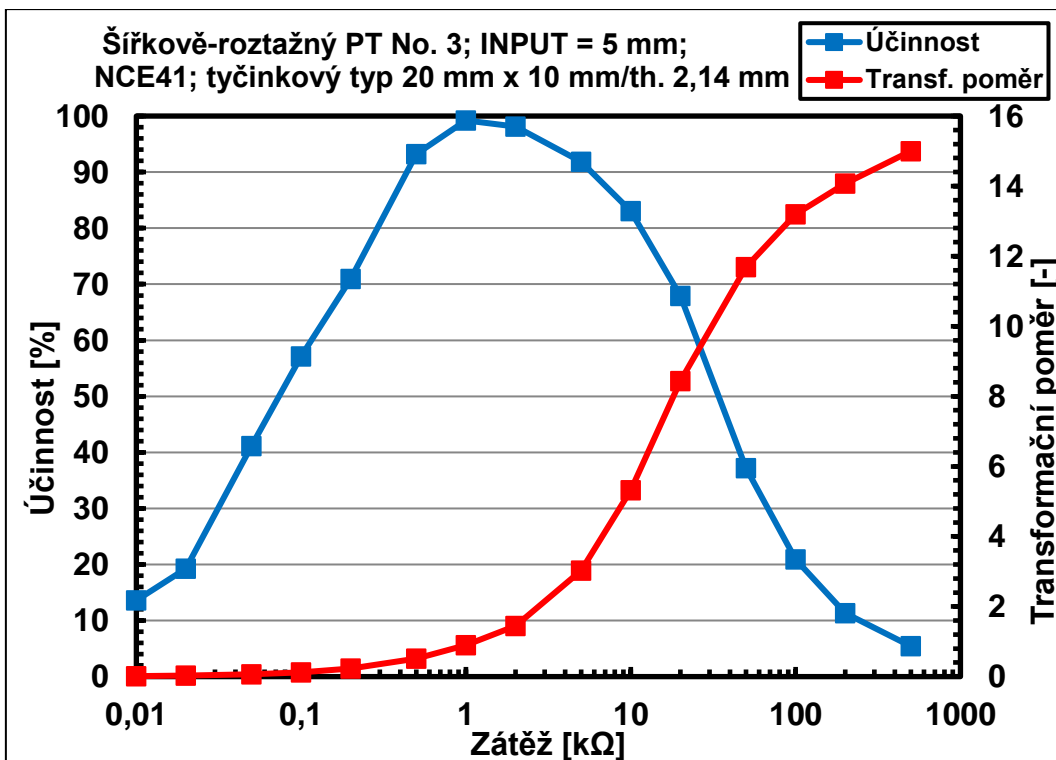
Graf č. 29

Graf zesílení napětí naprázdno pro transformátor se vstupní elektrodou šířky 5 mm.



Graf č. 30

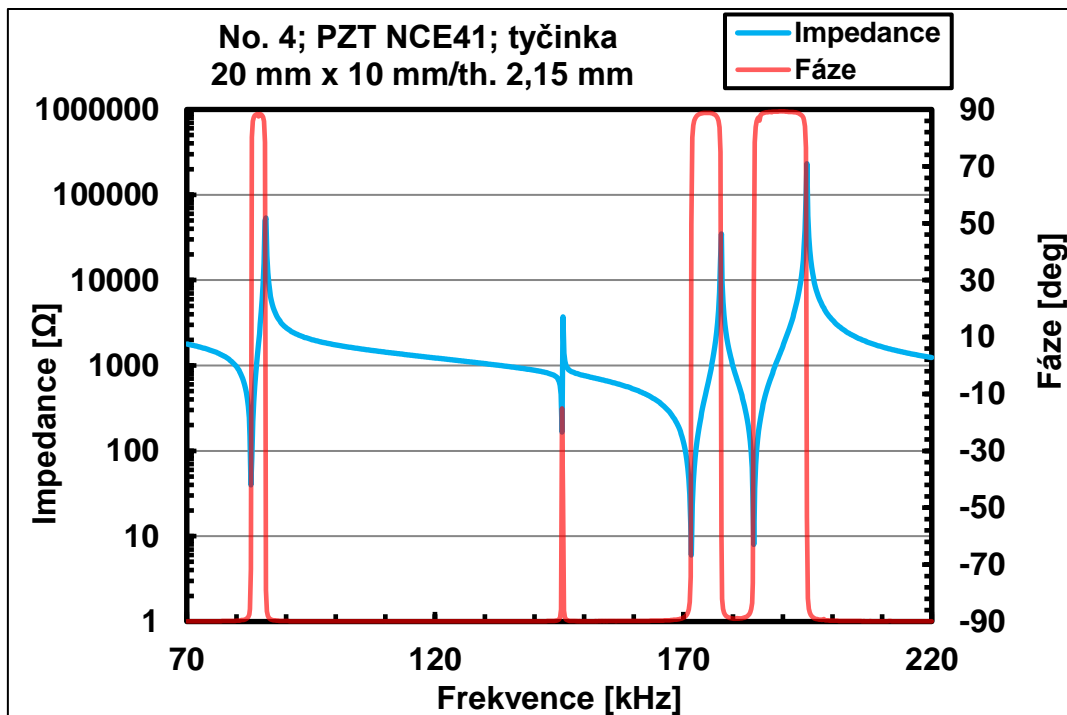
Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro mód kmitu  $k'_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 5 mm.



Graf č. 31

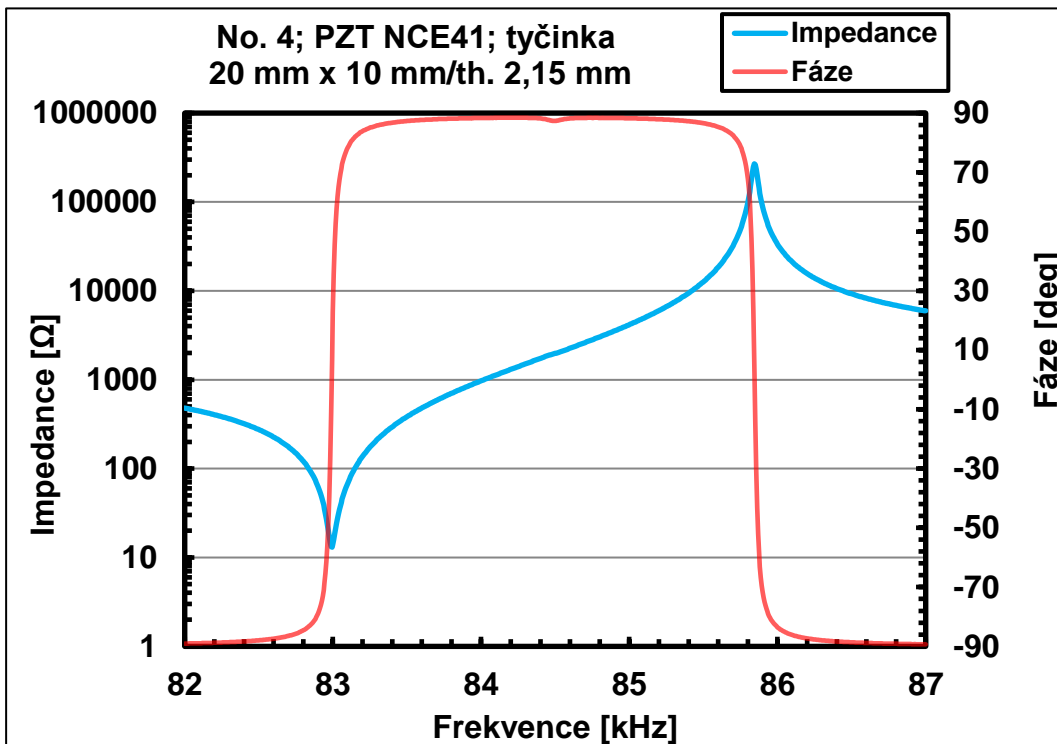
Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro harmonický mód k módu kmitu  $k_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 5 mm.

## Vzorek #4



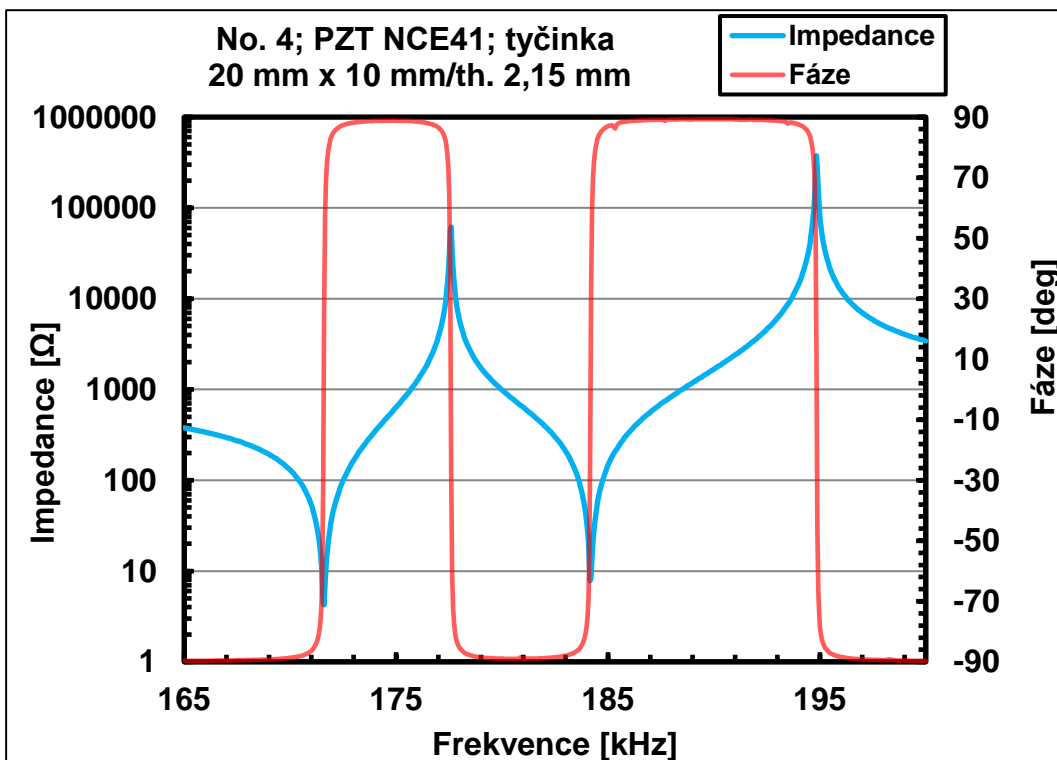
Graf č. 32

Graf závislosti impedance na frekvenci. U frekvence kolem 85 kHz se nachází mód kmitu  $k_{31}$ . A u frekvence kolem 185 kHz se nachází mód kmitu  $k'_{31}$ , který vazbí s harmonickým módem kmitu ke  $k_{31}$ .



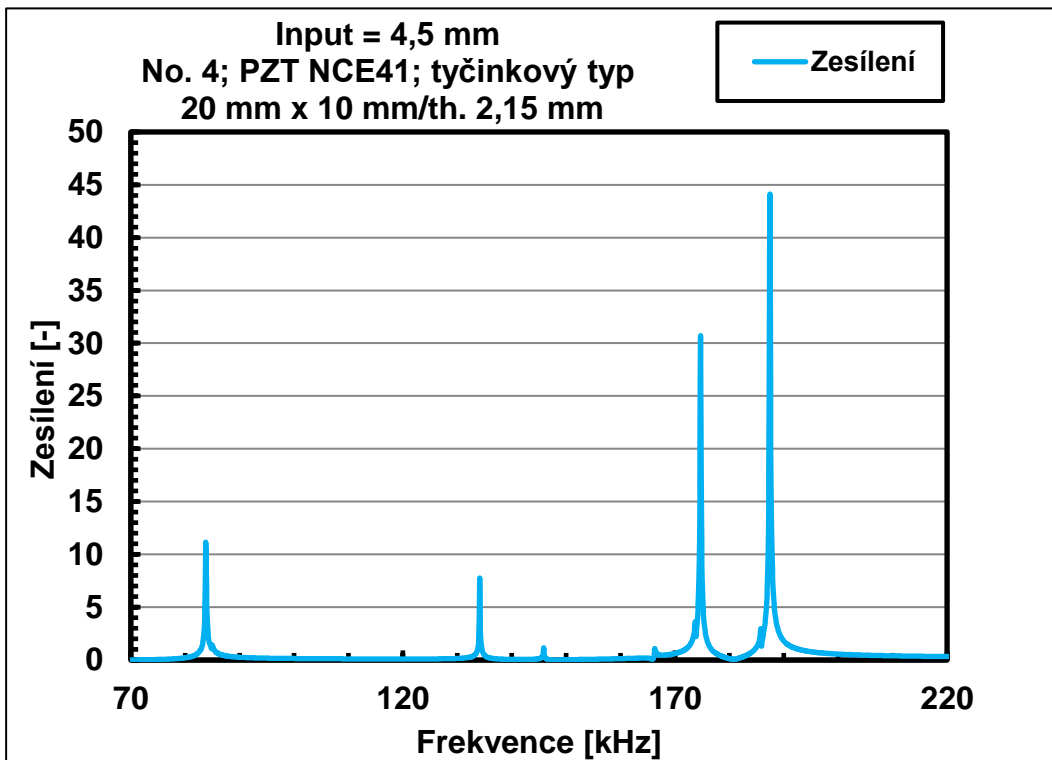
Graf č. 33

Detail grafu pro frekvence okolo 85 kHz, kde se nachází mód  $k_{31}$ .



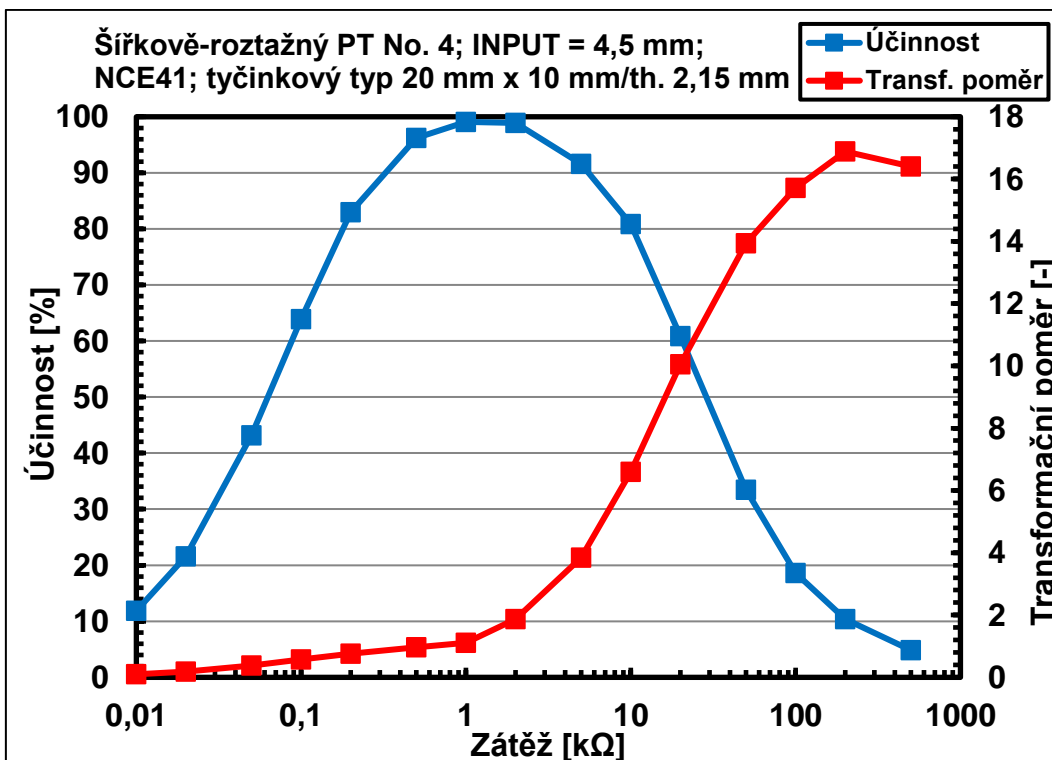
Graf č. 34

Detail grafu pro frekvence okolo 185 kHz, kde se nachází mód  $k'_{31}$ . První mód kmitu je harmonický k módu kmitu  $k_{31}$ .



Graf č. 35

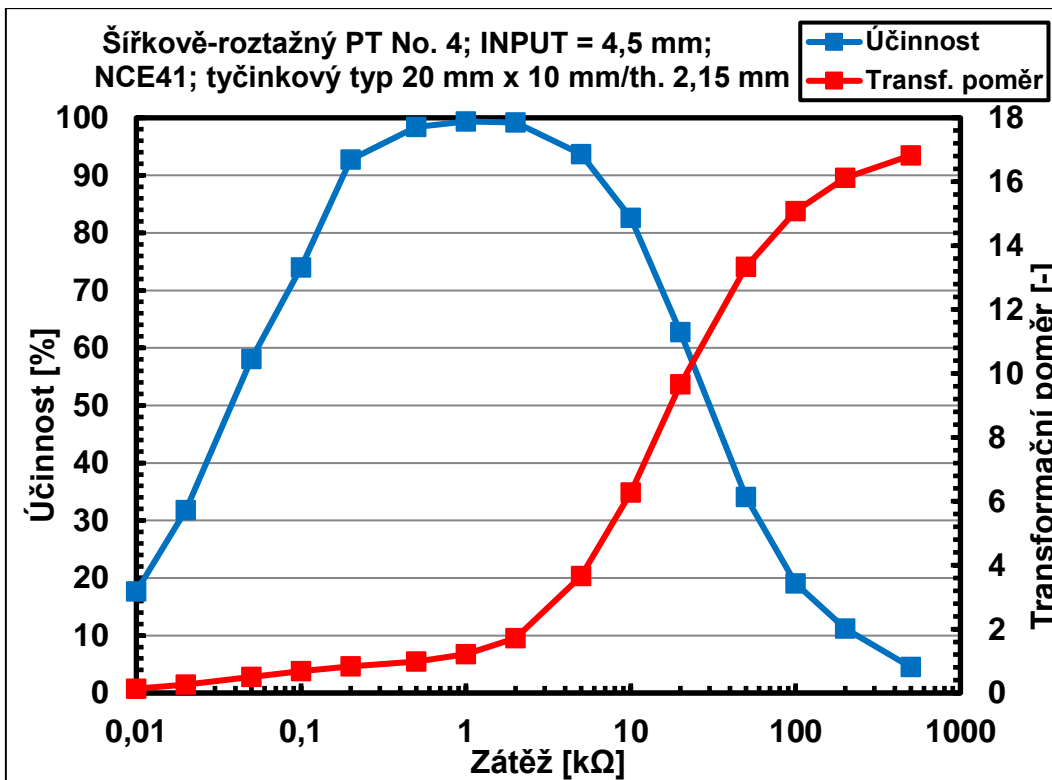
Graf zesílení napětí naprázdno pro transformátor se vstupní elektrodou šířky 4,5 mm.



Graf č. 36

Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro mód kmitu  $k'_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 4,5 mm.

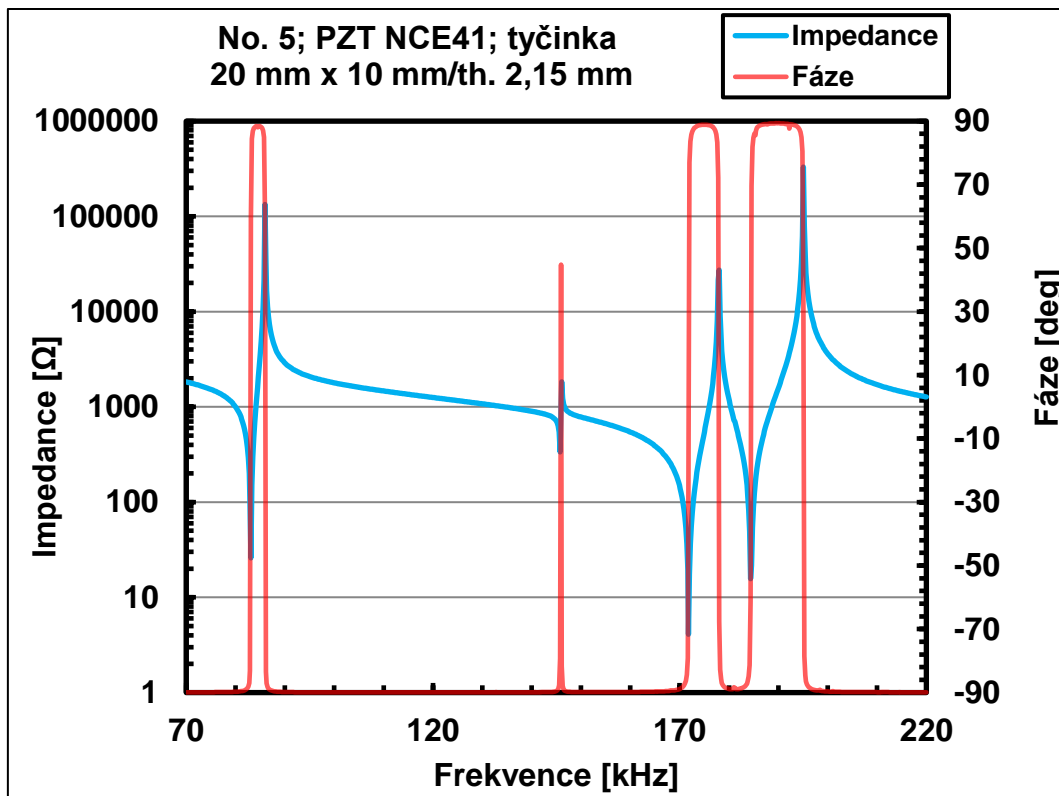




Graf č. 37

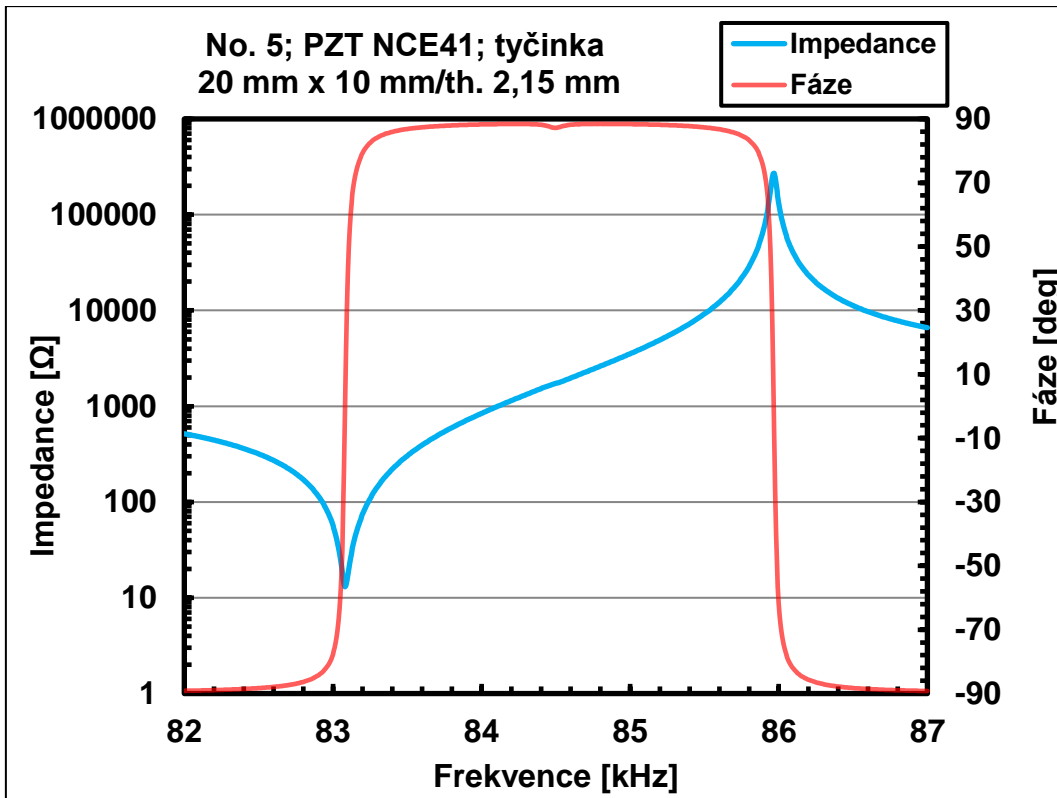
Graf závislosti transformačního poměru a účinnosti na zátěži pro harmonický mód k módu kmitu  $k_{31}$  transformátoru se vstupní elektrodou o velikosti 4,5 mm.

## Vzorek #5



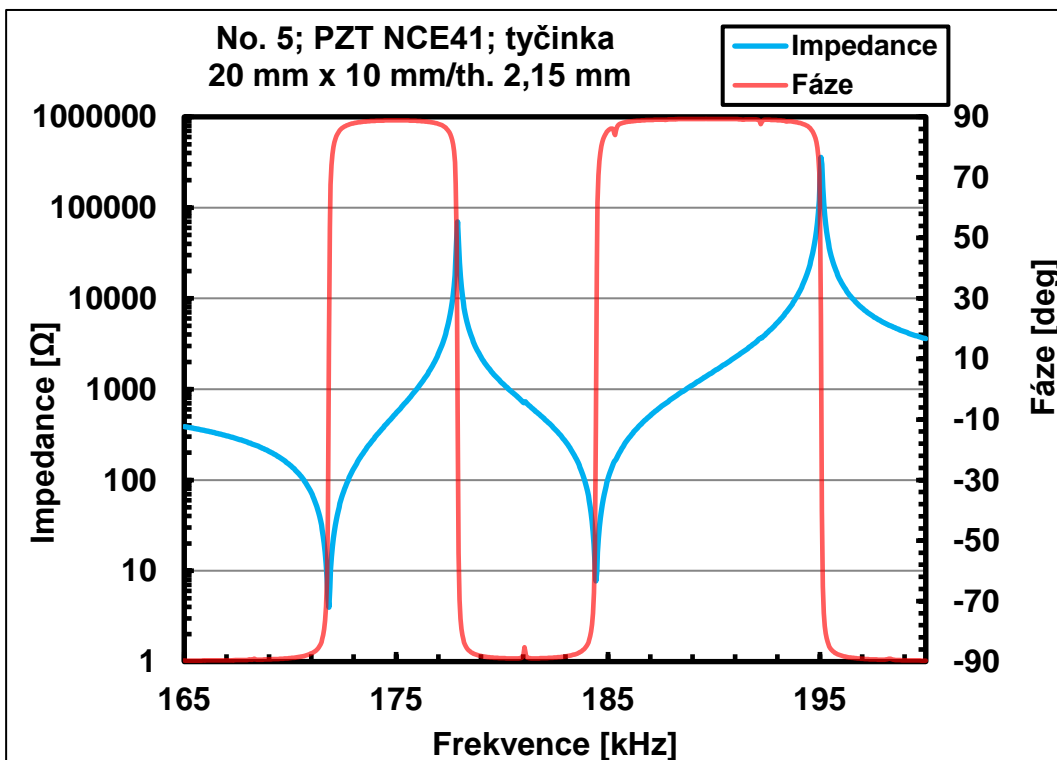
Graf č. 38

Graf závislosti impedance na frekvenci. U frekvence kolem 85 kHz se nachází mód kmitu  $k_{31}$ . A u frekvence kolem 185 kHz se nachází mód kmitu  $k'_{31}$ , který vazbí s harmonickým módem kmitu ke  $k_{31}$ .



Graf č. 39

Detail grafu pro frekvence okolo 85 kHz, kde se nachází mód  $k_{31}$ .



Graf č. 40

Detail grafu pro frekvence okolo 185 kHz, kde se nachází mód  $k'_{31}$ . První mód kmitu je harmonický k módu kmitu  $k_{31}$ .