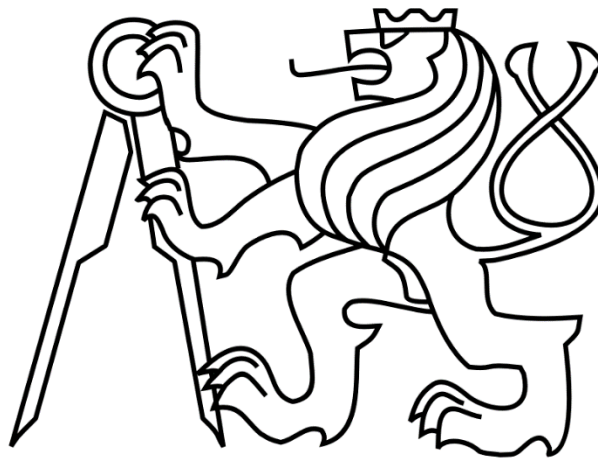


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Napájení snímačů na rotujících strojních částech

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Húska** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **434245**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Napájení snímačů na rotujících strojních částech

Název diplomové práce anglicky:

Power supply for sensors on rotating machine parts

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Cílem práce je zmapovat možnosti napájení snímačů a související elektroniky na rotujících strojních částech.;
Osнова práce: Zpracujte rešerši možností napájení elektroniky na rotujících strojních částech. Vytipujte vhodné způsoby napájení pro zadaný vřeteník s max. otáčkami 3000 ot./min a s požadavky stejnosměrného napájení ve třech větvích: 3,3 V / 1 W; 5 V / 0,75 W; 9 až 40 V / 4,2 W. Vyberte nejvhodnější komerčně dostupné řešení, pro které zpracujete koncepční návrh integrace zařízení na vřeteno. Navrhněte a realizujte laboratorní test pro ověření funkce napájení.; Rozsah textové části 60 – 80 stran.

Seznam doporučené literatury:

BLOKHINA, Elena, et al. Introduction to Vibration Energy Harvesting. In: Nonlinearity in Energy Harvesting Systems. Springer, Cham, 2016. p. 1-21.; RAO, TS Chandrasekar; GEETHA, K. Categories, standards and recent trends in wireless power transfer: A survey. Indian Journal of Science and Technology. 2016, 9(20). ISSN 09745645.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Lukáš Novotný, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

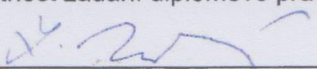
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

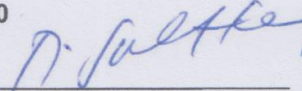
Ing. Jiří Švéda, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

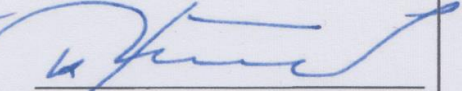
Datum zadání diplomové práce: **28.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **19.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2020**


Ing. Lukáš Novotný, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

7.7.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 8.7.2020



.....
podpis

Poděkování

Nejen během psaní této práce, ale i během celého mého studia mne podpořila řada lidí, kterým bych chtěl tímto způsobem poděkovat. Mé srdečné díky patří zejména rodičům, bez kterých bych nedostal možnost studovat ani psát tuto práci. Dále bych rád poděkoval prarodičům za podporu, kterou mi po celou dobu studia poskytovali. Velké díky patří zejména mému dědovi a Janu Dupákovi, kteří mě uvedli do světa strojařiny a ukázali mi tento olejem prosáklý svět ložisek a ozubených kol. Nesmím také zapomenout na mou přítelkyni, která o mne během psaní této práce s láskou pečovala a pomáhala mi se krok za krokem přiblížit k cíli. Závěrem bych rád vyjádřil vděčnost svému vedoucímu diplomové práce, který byl mým kompasem a průvodcem celou práci, kterou jsem díky němu dovedl do (snad) zdárného konce.

Děkuji.

Anotace

Autor:	Bc. Lukáš Húska
Název DP:	Napájení snímačů na rotujících strojních částech
Rozsah práce:	67 str., 62 obr., 22tab.
Školní rok vyhotovení:	2020
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Lukáš Novotný, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Využití:	Napájení snímačů a drobné elektroniky na rotujících částech stroje.
Klíčová slova:	rekuperace, piezoelektrický, elektromagnetický, elektrostatický, bezdrátový, generátor, indukční, mikrovlnný, rezonance, sběrné kroužky, alternátor, indukční cívky
Anotace:	Diplomová práce se zabývá možnostmi napájení elektrických struktur v rotačních částech stroje. Možném využití rekuperace vibrací, bezdrátového přenosu, sběrných kroužků a generováním energie pomocí generátoru. Z těchto možností je vybrána nejvíce vhodná metoda, pro kterou je zvoleno komerční zařízení a navržen test k ověření schopnosti napájení.

Annotation

Author:	Bc. Lukáš Húska
Title of thesis:	Power supply for sensors on rotating machine parts
Extent:	67 p., 62 fig., 22 tab.
Academic year:	2020
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Lukáš Novotný, Ph.D.
Consultant:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Submitter of the Theme:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Power supply for sensors and small electronics on rotating machine parts
Key words:	recuperation, piezoelectric, electromagnetic, electrostatic, wireless, generator, inductive, microwave, resonance, slip rings, alternator, induction coils
Annotation:	The diploma thesis deals with the possibilities of powering electrical structures in the rotating machine parts. Possible use of vibration recovery, wireless transmission, slip rings and energy generation with a generator. From these options is selected the most suitable method. For which a commercial device is selected, and a test is designed to verify the power supply capability.

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Popis
PZT	sloučenina olova, zirkonu a titanu
MEMS	micro electromechanical systems (mikro elektromechanické systémy)
WPT	wireless power transfer (bezdrátový přenos energie)
Tx	power transmitter (vysílač energie)
Rx	power receiver (přijímač energie)
Qi	standard pro bezdrátové nabíjení pomocí elektrické indukce
PMA	Power Matters Alliance (organizace zabývající se bezdrátovým napájením)
Pi	kovalentní vazba

Seznam použitých veličin

Veličina	Zkratka	Jednotky
Otáčky	n	Ot/min
Stejnoseměrné napětí	U	VDC (V)
Proud	I	mA, A
Výkon	P	nW, μ W, mW, W
Frekvence	f	Hz, kHz, MHz, GHz
Objem	V	cm ³
Délka	l	mm
Hmotnost	m	g
Odpor	R	Ω
Energie	E	J
Kapacita	C	F
Čas	t	s

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Cíl práce.....	11
3. Rešerše.....	12
3.1. Rekuperace energie	12
3.1.1. Základní rozdělení rekuperace energie.....	12
3.1.2. Piezoelektrické články	14
3.1.3. Elektromagnetické generátory	15
3.1.4. Elektrostatické generátory	16
3.1.5. Dosahované výkony rekuperačních systémů.....	16
3.1.6. Existující komerční zařízení.....	17
3.2. Bezdrátový přenos energie přes vzduchovou mezeru.....	20
3.2.1. Základní rozdělení bezdrátového přenosu.....	20
3.2.2. Indukční přenos energie	20
3.2.3. Mikrovlnný přenos energie.....	22
3.2.4. Elektromagnetická rezonance	24
3.2.5. Srovnání bezdrátových přenosů	25
3.2.6. Existující komerční zařízení.....	26
3.3. Rotační přívod energie – sběrné kroužky.....	28
3.3.1. Klasické kontaktní sběrné kroužky.....	28
3.3.2. Rtuťové kroužky	29
3.3.3. „Pancake“ sběrné kroužky.....	29
3.3.4. Existující komerční zařízení.....	29
3.4. Generování elektrického proudu přímo na vřetení.....	31
3.4.1. Dynamo.....	31
3.4.2. Alternátor.....	31
3.4.3. Vlastní řešení integrace generátoru.....	32
4. Rozbor požadavků a vyhodnocení rešerše.....	33
4.1. Oblasti řešení a zaměření práce	33

4.2. Vhodnost nalezených řešení.....	33
4.2.1. Nepoužitelné systémy	34
4.2.2. Nevhodné systémy	35
4.2.3. Vhodné systémy	35
5. Varianty řešení	36
5.1. Sběrné kroužky.....	36
5.2. Generování elektrické energie přímo na vřetení.....	37
5.3. Indukční přenos energie	39
6. Realizace a testování zařízení.....	42
6.1. Koncepční návrh testu indukčních cívek	42
6.1.1. Koncepce elektrického zapojení	42
6.1.2. Konstrukce nástavce pro uložení cívek.....	43
6.1.3. Měření a sběr dat	45
6.1.4. Napájení reálných snímačů pomocí indukčních cívek.....	45
6.2. Ověření funkce indukčních cívek na provizorním testovacím zařízení.....	47
6.2.1. Konstrukce měřicího zařízení	48
6.2.2. Průběh měření – statický přenos	49
6.2.3. Průběh měření – přenos za rotace	53
6.2.4. Vyhodnocení měření	57
7. Závěr.....	59
Seznamy	60
Seznam obrázků.....	60
Seznam tabulek.....	62
Seznam rovnic.....	63
Seznam použité literatury	63
Seznam Příloh	66
Textové přílohy.....	66
Elektronické přílohy.....	66

1. Úvod

Moderní stroje a zařízení stále více využívají bezdrátových systémů. Ať už se jedná o pouhou identifikaci nástrojů pomocí RFID čipů nebo přímou komunikaci a přenos dat přes WiFi, Bluetooth nebo jiný komunikační standard. Jakmile tyto snímače bezdrátově komunikují, je potřeba je také bezdrátově napájet. Použití bezdrátového napájení na rotační části stroje nabízí oproti stávajícím kabelovým řešením (rotačním přívodům) několik výhod. Mezi ně patří větší flexibilita pohybu, snadnost implementace a možnost umístění senzorů na dříve nepřístupných místech. Schopnost dovybavit systémy bez nutnosti zvažování problémů, jako je kabeláž nebo životnost baterií, nabízí významnou výhodu v oblastech, jako je monitorování systému založené na stavu, kde vestavěné bezdrátové mikrosenzory mohou poskytovat nepřetržité sledování stavu stroje a jeho struktur.

2. Cíl práce

Cílem práce je zmapovat možnosti napájení drobných elektrických struktur na rotačních částech stroje, zjistit možnost rekuperace energie ze struktur stroje a její využití pro napájení bezdrátových zařízení, zejména na pohyblivých strojních částech s problémovým přívodem energie (např. snímače teploty, vibrací a deformací), zjistit možnosti bezdrátového přenosu energie přes vzduchovou mezeru při pohybu (konkrétně rotaci) a dalších způsobů napájení elektrických zařízení. Ze zkoumaných řešení zvolit tu nejvhodnější metodu napájení a realizovat experiment se zvoleným komerčním zařízením.

3. Rešerše

S rozvojem monitorování strojů na základě sledování jeho stavu a případné predikce poruchy za účelem vyšší kvality výroby a nebo z jiných specifických důvodů, se na strojní části přidávají různé snímače. Například to mohou být snímače teploty, akcelerometry, snímače polohy nebo tenzometry. V současné době je mnoho těchto snímačů bezdrátových, a proto je potřeba nalézt vhodné bezdrátové napájení. Jako možné řešení by se mohlo jevit použití baterií, které by napájely sadu snímačů. Ty ovšem z hlediska životnosti a nutnosti výměny nejsou vhodné pro výkonově náročnější aplikace nebo obtížně dostupné prostory. Zároveň náklady na údržbu a výměnu baterií mohou mnohdy přesáhnout cenu senzoru.

Pokud chceme napájet skupinu snímačů na rotující součásti, nejběžnější jsou tyto 4 možnosti:

- Rekuperace energie
- Bezdrátový přenos energie
- Rotační přívody
- Aplikace generátoru

Ve strojírenství není zas tak běžné použití bezdrátového napájení. Ve většině případů se používají právě rotační přívody. Pokud bychom se ale chtěli zaměřit na zpřesňování výroby, zvyšování životnosti strojů nebo třeba na specifické uspořádání strojů, kde by použití rotačních přívodů nebylo vhodné, jeví se jako správná volba právě bezdrátové napájení. V následujících kapitolách budou průběžně probrány jednotlivé varianty a jejich možnosti využití.

3.1. Rekuperace energie

3.1.1. Základní rozdělení rekuperace energie

Elektrickou energii lze generovat ze světelné, tepelné a kinetické energie přítomné v prostředí senzorů a snímačů. Tyto zdroje lze použít buď jako přímý zdroj, nebo spíše pro nabíjení baterie vestavěné v senzoru, čímž se prodlouží její životnost. Hlavním důvodem je nestálost zdroje energie.

Solární energie

Solární články nabízejí vynikající hustotu energie na přímém slunečním světle, ale jsou omezeny za ztmavých okolních světelných podmínek a jsou zjevně nevhodné v zabudovaných aplikacích, kde nemůže být přítomno žádné světlo, nebo kde solární buňky mohou být zakryty nečistotami.

I z dalších technologických důvodů není vhodné jejich použití. Zejména generované teplo, které nepříznivě ovlivňuje stroj hned v několika ohledech, je nežádoucí.

Tepelná energie

Tepelná energie může být pohodlně převedena na elektrickou energii pomocí Seebeckova efektu (termoelektrický jev). Dříve termoelektrické mikrogenerátory vyráběly pouze několik nW, v poslední době ale byly kombinovány s komorami pro spalování s cílem zlepšit výstupní výkon na cca 1 μ W / termočlánek. Nicméně zde opět čelíme problému tepla, které sebou nese řadu nepříjemností, jako třeba deformace vzniklé tepelnou roztažností částí stroje. Nemluvě o příliš nízkém výkonu na to, aby byly schopné napájet větší soustavu snímačů a komunikačního rozhraní. [1]

Jak solární energie, přesněji záření, tak tepelná energie by se daly vytvořit uměle a přenášet je na určitou vzdálenost. To už se ale jedná o přenos energie, nikoliv rekuperaci. Přenosům se bude věnovat kapitola 3.2.

Kinetická energie

Předchozí dvě možnosti rekuperace jsou pro výrobní stroje téměř nepoužitelné ať už pro velké rozměry, nízké výkony nebo již zmíněné nevýhody. Proto se tato práce zaměří na generátory kinetické energie, které přeměňují energii ve formě mechanického pohybu přítomného v aplikačním prostředí na elektrickou energii.

Kinetická energie je obvykle přítomna ve formě vibrací, náhodných posunů nebo sil a obvykle se převádí na elektrickou energii pomocí elektromagnetických, piezoelektrických nebo elektrostatických mechanismů. Vhodné vibrace lze nalézt v mnoha aplikacích včetně výrobních strojů. Množství energie generované tímto přístupem závisí v zásadě na množství a formě kinetické energie dostupné v aplikačním prostředí a účinnosti generátoru a elektroniky pro převod energie. [2]

Sběr kinetické energie vyžaduje přenosový mechanismus pro generování elektrické energie z pohybu. Generátor bude vyžadovat mechanický systém, který spojuje environmentální posuny s transdukčním mechanismem. Konstrukce mechanického systému by měla maximalizovat spojení mezi zdrojem kinetické energie a přenosovým mechanismem a bude zcela záviset na charakteristikách pohybu prostředí. Vibrační energie je nejvhodnější pro inerciální generátory s mechanickou součástí připojenou k rámu, který funguje jako pevná reference. Rám přenáší vibrace na zavěšenou inerciální hmotu, která mezi nimi vytváří relativní posun. Takový systém bude mít rezonanční frekvenci, která může být navržena tak, aby odpovídala charakteristické frekvenci aplikačního prostředí.

Tento přístup zvětšuje amplitudu vibrací v okolí v závislosti na kvalitě rezonančního systému. [1, 2]

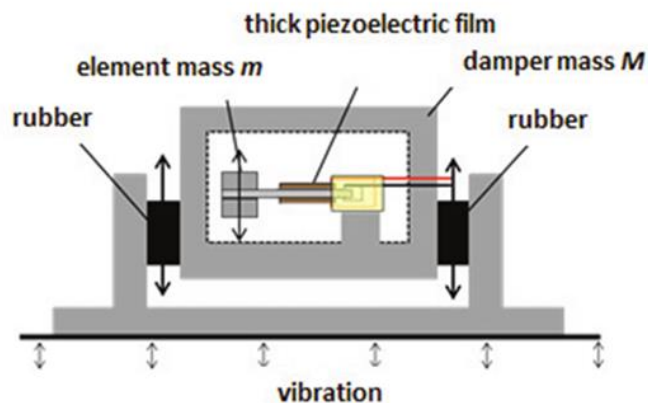
Samotný přenosový mechanismus může vyrábět elektřinu využitím mechanického namáhání nebo relativního posunutí, ke kterému dochází v systému. Využívá se deformace uvnitř mechanického systému – obvykle použitím aktivních materiálů (např. Piezoelektrická keramika). V případě relativního posunutí může být rychlost nebo poloha zdrojem energie pro elektromagnetický či elektrostatický přenos. Konkrétně rychlost je obvykle spojena s elektromagnetickým přenosem, zatímco relativní poloha je spojena s elektrostatickým přenosem. Každý přenosový mechanismus vykazuje odlišné tlumící vlastnosti, to by mělo být zohledněno při modelování generátorů. Mechanický systém může být složitější, například začleněním hydraulického systému pro zvětšení amplitud, sil nebo spojením lineárních posunů do rotačních generátorů. [1]

3.1.2. Piezoelektrické články

Piezoelektrická keramika se používá již mnoho let k přeměně mechanické energie na elektrickou. Piezoelektrický efekt objevili J. a P. Curieovi v roce 1880. Zjistili, že když byly určité krystaly vystaveny mechanickému napětí, staly se elektricky polarizované a stupeň polarizace byl úměrný použitému napětí. Naopak se tyto materiály při vystavení elektrického pole deformují. Piezoelektrické materiály jsou široce dostupné v mnoha formách včetně monokrystalu (např. křemene), piezokeramiky (např. titaničitan zirkoničitý nebo PZT), tenkého filmu (např. napařovaný oxid zinečnatý), atd.

Piezoelektrické materiály obvykle vykazují anizotropní vlastnosti, proto se vlastnosti materiálu liší v závislosti na směru sil a orientaci polarizace a elektrody. [1, 3, 4]

Nabízejí nejjednodušší převod vibrační energie na elektrickou. Není potřeba složitých konstrukcí a velkého množství komponent. Jedná se o konstrukčně velmi jednoduchý typ generátoru (viz Obr. 1). Avšak jejich mechanické vlastnosti omezují celkový výkon a životnost generátoru. [1–3]



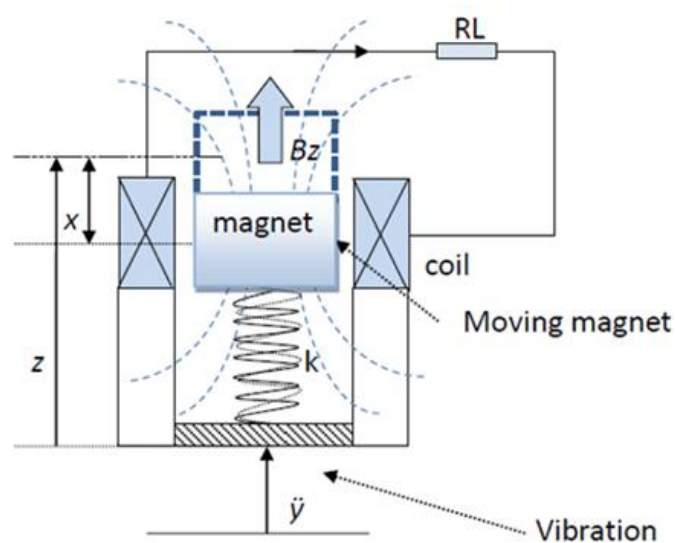
Obr. 1 Schéma vibračního piezoelektrického generátoru [5]

3.1.3. Elektromagnetické generátory

Elektromagnetická indukce je generování elektrického proudu ve vodiči uvnitř magnetického pole. Vodič má obvykle podobu cívky a elektřina je generována buď vzájemným pohybem magnetu a cívky nebo změnou magnetického pole. V prvním případě množství vygenerované elektřiny závisí na síle magnetického pole a rychlosti relativního pohybu cívky. [2]

Tyto kinetické elektromagnetické generátory lze modelovat jako tlumičový systém s pružinou a hmotou na jejím konci (viz Obr. 2), tedy zjednodušeně jako mechanický systém s jedním stupněm volnosti. Podmínkou, aby generátory mohly efektivně generovat napětí a proud, je harmonická excitace. [6]

Jedná se o řadu let používanou technologii, kde existuje spousta konfigurací na bázi pružina-závaží a různé typy materiálu. Dosahuje poměrně vysokých hodnot generovaného proudu ale nízkého napětí (konkrétní hodnoty viz Tab. 1). [2]



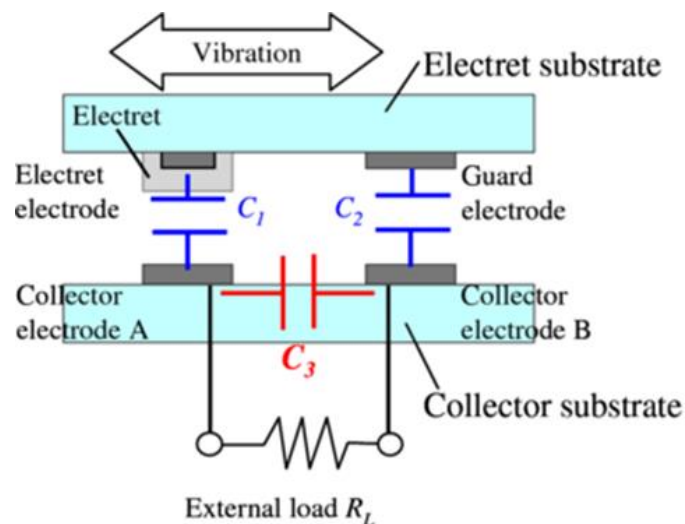
Obr. 2 Generování elektrického proudu magnetickou indukcí [2]

3.1.4. Elektrostatické generátory

Elektrostatický generátor je založen na proměnném kondenzátoru, jehož desky se pohybují vlivem vnějších sil. Využívá relativní pohyb mezi elektricky izolovanými nabitými deskami kondenzátoru pro generování energie.

Elektret je permanentně polarizované těleso, taková elektrická obdoba permanentního magnetu. Tento elektret materiál (viz Obr. 3) produkuje počáteční distribuci náboje a když se kondenzátor pohybuje vnějším vlivem, generuje se pohyb náboje. [1, 2, 7]

Elektrostatické systémy sběru energie mohou být vyrobeny na principu MEMS technologií (Micro Electro Mechanical Systems) a produkují energii, jejíž hodnoty jsou v některých případech nezávislé na frekvenci pohybu. Kvůli malým rozměrům je však hodnota vyrobené energie velmi nízká, minimálně o jeden řád menší než elektromagnetické generátory. Pro tyto generátory je typické, že produkují vysoké výstupní napětí a mají omezenou schopnost dodávat proud. [1, 2, 8]



Obr. 3 Schéma elektrostatického generátoru s elektretovým tělesem [8]

3.1.5. Dosahované výkony rekuperačních systémů

Vibrační rekuperační systémy nepatří všeobecně mezi nejvýkonnější (viz Tab. 1). Jejich výhodou jsou malé rozměry, díky kterým se dají použít i na hůře dostupných místech. Při požadavku na vyšší výkon je možné použít více generátorů současně.

Tab. 1 Porovnání parametrů dosahovaných jednotlivými generátory [1, 2]

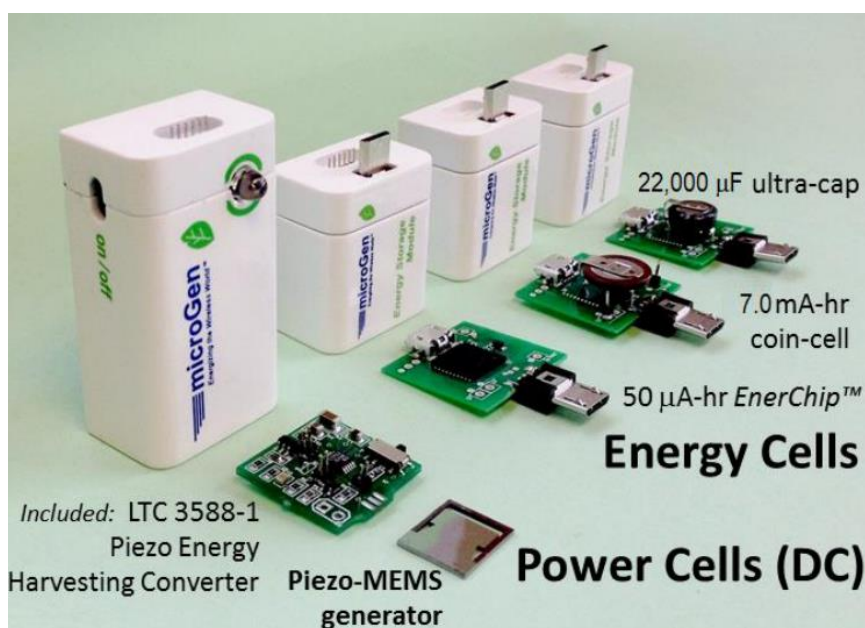
Typ Generátoru	Výkon [μ W]	Napětí [V]	Frekvence [Hz]	Rozměry generátoru [cm^3]
Piezoelektrický	1 ÷ 375	2 ÷ 10	80 ÷ 200	1
Elektromagnetický	4000 ÷ 7000	<1	35 ÷ 100	10 ÷ 30
Elektrostatický	1 ÷ 1000	>100	30 ÷ 50	0,5 ÷ 2

* Udávaná frekvence označuje pracovní rozsah, při kterém je rekuperátor schopný generovat proud

3.1.6. Existující komerční zařízení

MicroGen

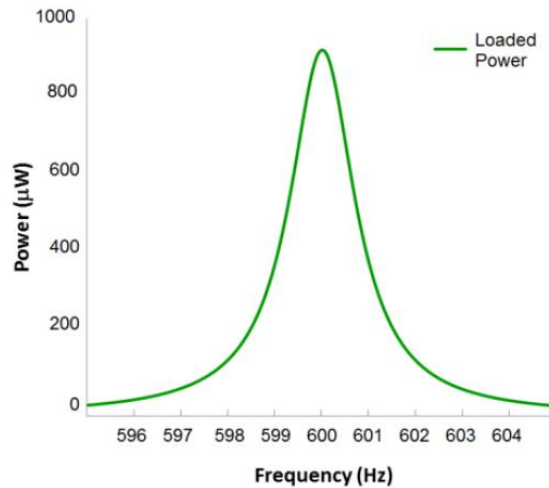
Zařízení pracující na principu piezoelektrických článků od firmy BOLT (viz Obr. 4). Tyto jednotky obsahují mikrogenerátor, elektroniku pro usměrnění a regulaci napětí a malý kondenzátor pro ukládání energie. Často se využívají pro MEMS sensory jako jsou akcelerometr, gyroskop, snímač světla atd., kde je jejich výkon dostačující. Výkony jednotlivých modelů jsou vidět v Tab. 2.



Obr. 4 Piezoelektrické MEMS vibrační generátory řady BOLT [9]

Tab. 2 Parametry zařízení řady BOLT s výstupem 2,5÷3,6V [9]

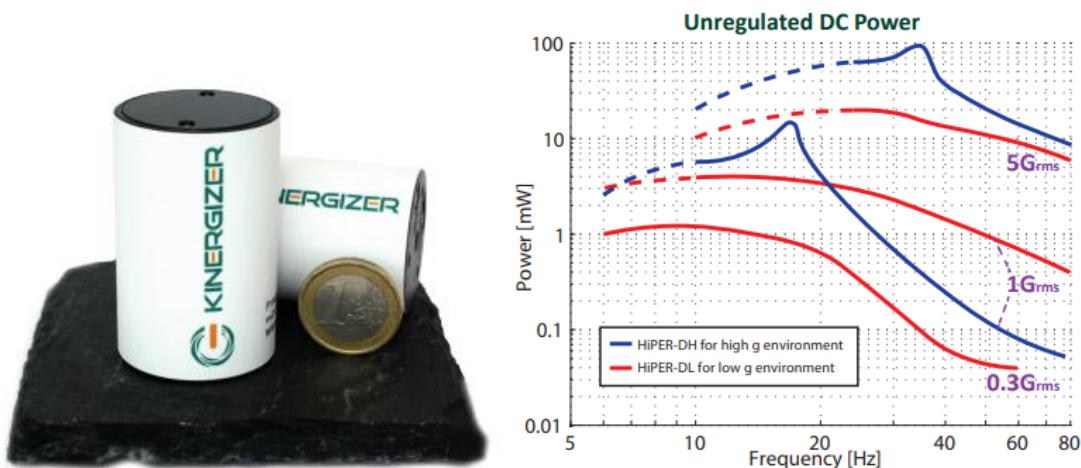
Model	Frekvence [Hz]	Výkon [μ W]	Rozměry [mm]	Hmotnost [g]
BOLT-M0100X	100	25 ÷ 100	48,5 x 26,5 x 17,5	25
BOLT-M0120X	120	25 ÷ 100	-	-
BOLT-M0600X	600	100 ÷ 400	-	-



Obr. 5 Závislost výkonu na frekvenci generátoru BOLT-M0100X [9]

KINERGIZER

Elektromagnetické generátory malých rozměrů od firmy KinerGizer. Jsou vhodné pro nižší frekvence (viz Obr. 6). Výrobce uvádí možnost nastavení na specifické pásmo frekvencí pro vyšší efektivitu rekuperace. Parametry zařízení jsou vidět v Tab. 3.



Obr. 6 Elektromagnetický HiPER-D KinerGizer generátor a jeho frekvenční charakteristika [10]

Tab. 3 Parametry zařízení generátoru KINERGIZER [10]

Model	Frekvence [Hz]	Výkon [mW]	Rozměry [mm]	Hmotnost [g]
HiPER-D	2 ÷ 200	89	∅35 x 71,3	90

ReVibe Energy

Další výrobce elektromagnetických generátorů. Nabízí více řad produktů dle výkonu (viz Obr. 7 a Tab. 4). Všechny modely jsou primárně určeny pro nízké frekvence. Tyto generátory se využívají pro rekuperaci vibrací čerpadel a kompresorů.



Obr. 7 ReVibe generátory [11]

Tab. 4 Parametry zařízení ReVibe s výstupem 2,8÷5V [11]

Model	Frekvence [Hz]	Výkon [mW]	Rozměry [mm]	Hmotnost [g]
modelD	20 ÷ 100	3 ÷ 127	∅33 x 64	125
modelQ	20 ÷ 100	1 ÷ 35	50 x 25 x 25	65
modelA	15 ÷ 100	2 ÷ 520	155 x 53 x 17	300

PMG Perpetuum

Elektromagnetický generátor je robustnější konstrukce (viz Obr. 8), která je dána náročným prostředím, kde se tento generátor používá, a to u podvozků kolejnicových vagonů. Obvykle generuje energii pro napájení GPS. Jeho životnost by měla být dle výrobce téměř neomezená. Robustní konstrukce se pak promítá do vysoké hmotnosti (viz Tab. 5). [12]



Obr. 8 PMG Perpetuum generátor [12]

Tab. 5 Parametry zařízení Perpetuum s výstupem 5V [12]

Model	Frekvence [Hz]	Výkon [mW]	Rozměry [mm]	Hmotnost [g]
Perpetuum	50 ÷ 60	4,2 ÷ 27,5	∅70 x 65	1030

3.2. Bezdrátový přenos energie přes vzduchovou mezeru

Technologie bezdrátového přenosu energie, dále jen WPT (Wireless Power Transfer), není nová technologie. Už v roce 1880 ji demonstroval Nikola Tesla ve svých experimentech. V podstatě se jedná o přenos energie bez potřeby jakýchkoliv vodičů nebo vodících elementů a elektrická energie je přenášena přes média jako je vzduch, ale i zeď, dřevo nebo voda. Pro bezdrátový přenos elektřiny se používají tři hlavní systémy: indukce, mikrovlny a rezonance. [13, 14]

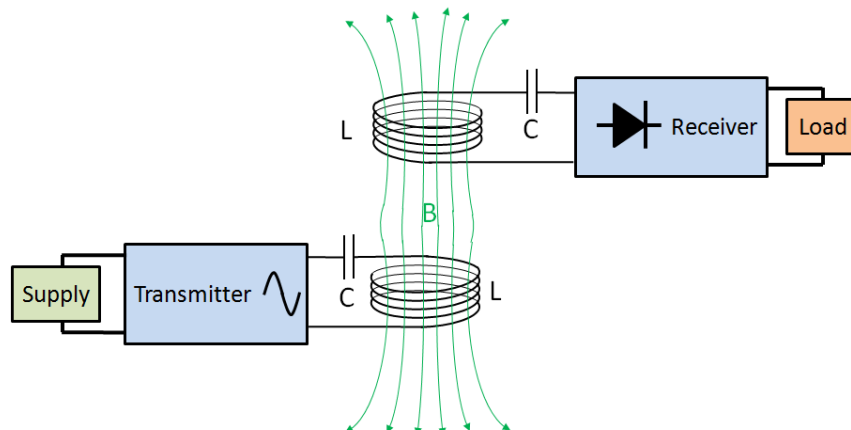
3.2.1. Základní rozdělení bezdrátového přenosu

Existují různé typy bezdrátového přenosu energie. Dají se rozdělit na základní 3 skupiny:

- Indukční přenos
 - Elektromagnetická indukce
 - Elektrodynamická indukce
 - Elektrostatická indukce
- Přenos zářením
 - Rádiové vlny
 - Mikrovlny
 - Laser
- Přenos rezonancí
 - Elektromagnetická rezonance
 - Evanescentní vlna
 - Kapacitní rezonanční vazba

Ne však všechny přenosy jsou vhodné pro použití ve strojírenství. Mezi ty běžné a aplikovatelné na stroje patří indukční přenos, mikrovlnný přenos a elektromagnetická rezonance. Tyto přenosy budou podrobněji vysvětleny a probrány v následujících podkapitolách. [14]

3.2.2. Indukční přenos energie



Obr. 9 Princip indukčního přenosu pomocí dvou cívek [15]

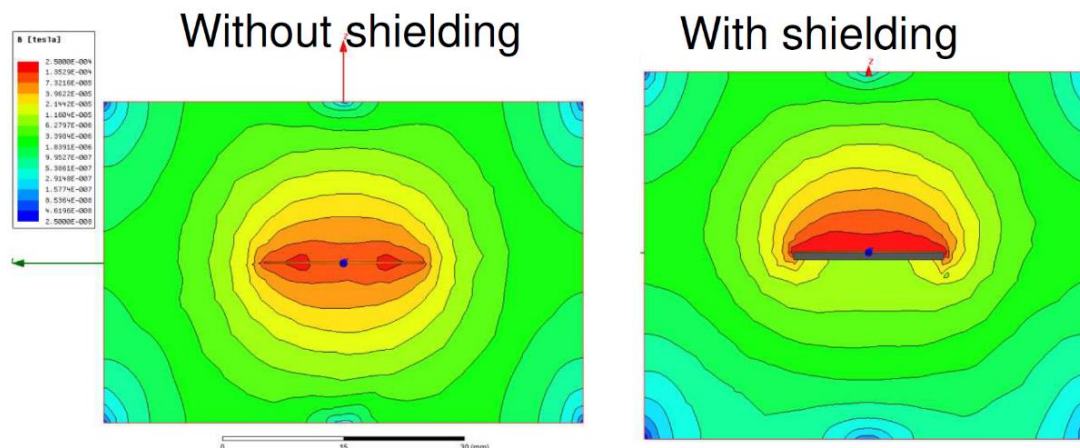
Princip je podobný jako u střídavého transformátoru. Indukční přenos je založený na vytváření elektromagnetického pole okolo napájené cívky (Tx – power transmitter) a indukování napětí v přijímací cívce (Rx – power receiver), která se v tomto poli vyskytuje (viz Obr. 9).

Jedná se o nejpoužívanější bezdrátový přenos, který se aktuálně hojně využívá pro napájení chytrých telefonů a drobných zařízení. Konkrétně se využívají standardy Qi a PMA (standardy vyvinuté sdružením výrobců bezdrátového napájení). Jedna zdrojová cívka je však schopná napájet pouze jednu přijímací cívku. [13, 14]

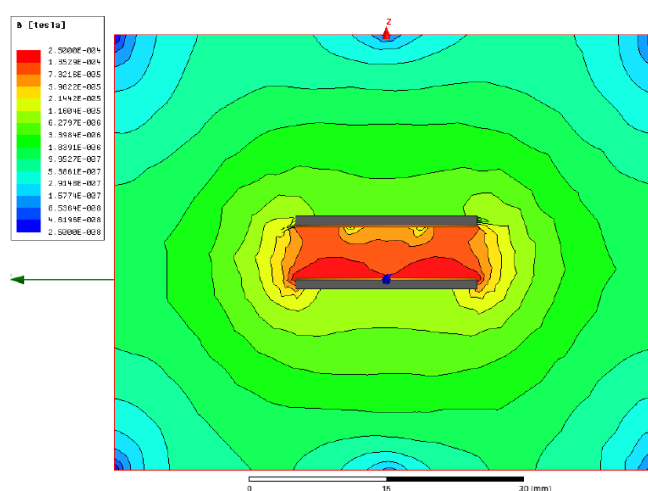
Podmínky použití indukčních cívek na rotačních částech strojů

Při použití indukčních cívek pro napájení elektrických zařízení na rotačních částech stroje je potřeba dodržet několik podmínek, které zajistí správnou funkci přenosu energie. Mezi hlavní podmínku patří správná poloha indukčních cívek. Magnetické pole kolem cívky se exponenciálně zmenšuje se vzdáleností, obvykle se používá mezi cívkami vzdálenost jen pár milimetrů. Je důležité, aby cívky ležely ve stejné ose. Přesazení cívek, byť jen o pár milimetrů, může zásadně snižovat účinnost až o desítky procent. Cívky by tedy měly být ideálně rovnoběžné, souosé a ve správné vzdálenosti. Každá odchylka od tohoto stavu způsobí ztráty v přenosu. Jak velké ztráty vzniknou v závislosti na odchylce, závisí na konkrétních cívkách a výrobcí. [13–15]

Indukční cívky vytváří kolem sebe magnetické pole, které může nepříznivě ovlivnit okolní části stroje. Zejména u kovových vodivých částí může docházet k ohřevu vlivem Joulova tepla, zejména při vyšších proudech. Pokud by se toto zařízení mělo použít pro přenášení velkých proudů, je potřeba zvážit jeho umístění, aby vzniklé teplo příliš neovlivňovalo mechanické vlastnosti dané části stroj. Lze také aplikovat vhodné stínění ze strany, kde nebude docházet k přenosu. Přidané stínění také pomůže usměrnit tok magnetického pole a zlepšit indukční přenos mezi cívkami. Na Obr. 10 je vidět rozdíl magnetického pole mezi cívkou se stíněním a bez něj. Na Obr. 11 je pak zobrazena dvojice cívek se stíněním na vnějších stranách. Ke stínění se může použít například feritová deska nebo fólie. [13–16]



Obr. 10 Rozdíl mezi indukční cívkou bez stínění vlevo a se stíněním vpravo [16]



Obr. 11 Magnetické pole pro dvojici stíněných cívek [16]

Většina indukčních cívek se prodává s vlastním obvodem pro zpracování vstupního a výstupního napětí. Pokud se umístí spolu s cívkou na rotační část stroje s vyššími otáčkami, může dojít k vytrhávání tištěných spojů obvodu cívky. Jako prevenci je vhodné použít zalévací hmotu pro elektroniku. Zalévací hmoty jsou nejčastěji z epoxidu, polyuretanu nebo silikonu. Zalití chrání elektroniku před odstředivou silou, rázy, vibracemi, ale také před korozí nebo možností zkratování. [17]

3.2.3. Mikrovlnný přenos energie

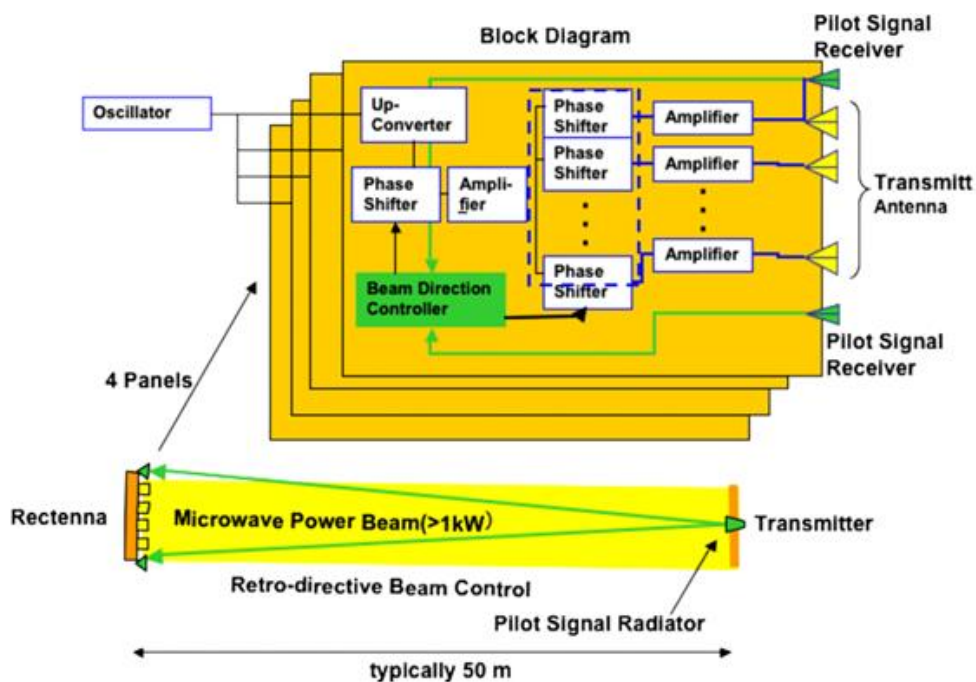
Bezdrátový přenos energie prostřednictvím rádia nebo mikrovln vyžaduje dokonalou souosost a výkonný soustředěný mikrovlnný nebo laserový paprsek (pokud má stejné vlastnosti jako mikrovlnný paprsek) jako zdroj energie. Při mikrovlnném přenosu se jako vysílací zařízení nejčastěji používá magnetron.

Mezi vysílacími zařízeními jsou dvě hlavní divize: mikrovlnné vakuové trubice a polovodičové mikrovlnné vysílače.

Mikrovlnná energie může pronikat deštěm, kouřem a drobnými nečistotami. Maximální hustota výkonu přenosu je založena na průměru „rekteny“. Jedná se o usměrňovač a přijímací anténu (viz Obr. 12). V principu rektena převádí přijímané mikrovlny na proud. [13–15]

Hlavní kroky k přenosu energie pomocí mikrovlnného přístupu jsou:

1. Převod elektrické energie na mikrovlny
2. Přijímání přenášené vlny pomocí rekteny
3. Regenerace energie z mikrovln



Obr. 12 Blokové schéma přenosu přes mikrovlny [18]

Popis přenosu

Nejprve se střídavý proud ze zdroje převede na stejnosměrný proud, který napájí magnetron. Poté magnetron vygeneruje mikrovlny. Ty se přivedou do vlnového vodiče a poté se vysílají přes anténu do prostoru. Nepřetržité vyzařování mikrovln z vysílacího zařízení je shromažďováno pomocí křemíkového řídicího usměrňovače na rekteně. Nakonec se přijatý mikrovlnný výkon převede zpět na stejnosměrný proud pro napájení dalších zařízení. Celková přenosová vzdálenost závisí na velikosti a přesnosti zařízení od několika desítek až stovek metrů. Nejčastěji se o mikrovlnném přenosu mluví v souvislosti s přenosem energie mezi zemí a satelity.

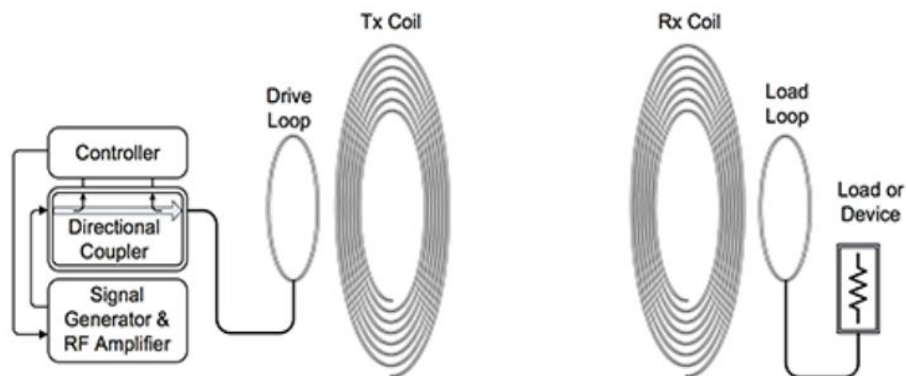
Většinou se však jedná o experimentální laboratorní zařízení, nikoliv hotový produkt aplikovatelný ve strojírenství. [13–15, 18]

3.2.4. Elektromagnetická rezonance

Metoda, která je podobná indukční, ale umožňuje o něco větší vzdálenost mezi cívkou vysílače a přijímače, se nazývá rezonanční induktivní vazba (viz Obr. 13). V tomto systému mají jak vysílač, tak přijímač rezonanční LC (cívka + kondenzátor) obvody naladěny na stejnou frekvenci a energie je přenášena přesně po této rezonanční frekvenci. Rezonance mezi dvěma naladěnými cívkami zlepšuje propojení a zlepšuje přenos energie. To umožňuje mírně větší vzdálenost mezi cívkou vysílače a přijímače než u elektromagnetické indukce, ale maximální přenositelný výkon je ve srovnání s ní nižší.

Také je možné umístit přijímač do různých poloh, protože energie rezonanční vazby proudí všemi směry. [13–15, 19]

Celkově je zde několik podobností s indukčním přenosem. Pro větší přehlednost jsou zásadní rozdíly rozepsány v Tab. 6.



Obr. 13 Princip rezonančního přenosu [14]

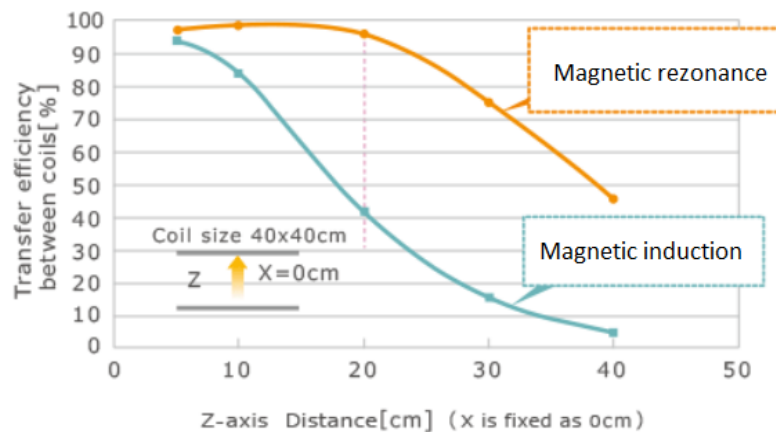
Tab. 6 Rozdíl mezi elektromagnetickou indukcí a magnetickou rezonancí [19]

Indukční přenos	Magnetická rezonance
Indukční účinek je způsoben přenosem elektrického náboje v řetězci atomů	Rezonanční účinek popisuje stabilitu molekuly v důsledku interakce mezi elektrony Pi vazby
Indukční účinek nastává v důsledku polarizace vazeb	Rezonanční účinek nastává v důsledku přítomnosti jednoduchých a dvojných vazeb dohromady
Indukční vysílací zařízení je schopné napájet jen jedno přijímací	Rezonanční vysílací zařízení je schopné napájet několik dalších přijímacích, a to v různých polohách

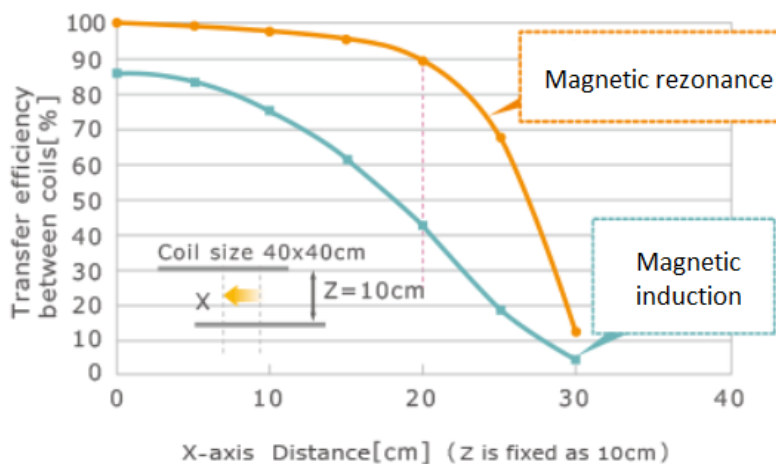
Zjednodušeně řečeno hlavním rozdílem mezi indukčním a rezonančním účinkem je ten, že indukce popisuje přenos elektrických nábojů mezi atomy v molekule, zatímco rezonanční účinek popisuje přenos párů elektronů mezi atomy v molekule. [19]

3.2.5. Srovnání bezdrátových přenosů

Na rozdíl od rekuperačních zařízení není u bezdrátových přenosů zásadní limitování výkonu, ale spíše účinnost přenosu. Největší vliv na účinnost mají vzdálenost cívek (viz Obr. 14) a přesazení cívek (Obr. 15). Bezdrátové přenosy jsou schopné přenést výrazně větší proudy a jsou stabilnější. Pokud se tedy nejedná vyloženě o izolovaný nedostupný systém, je bezdrátové napájení vhodnější volba než rekuperace energie. Co se týče přenosu pomocí mikrovln, tak základní parametry jsou vidět v Tab. 7.



Obr. 14 Porovnání účinnosti u rezonančního a indukčního přenosu se zvyšující se vzdáleností cívek [20]



Obr. 15 Porovnání účinnosti u rezonančního a indukčního přenosu se zvyšujícím se přesazením cívek [20]

Tab. 7 Porovnání parametrů dosahovaných jednotlivými přenosy [14, 18, 21]

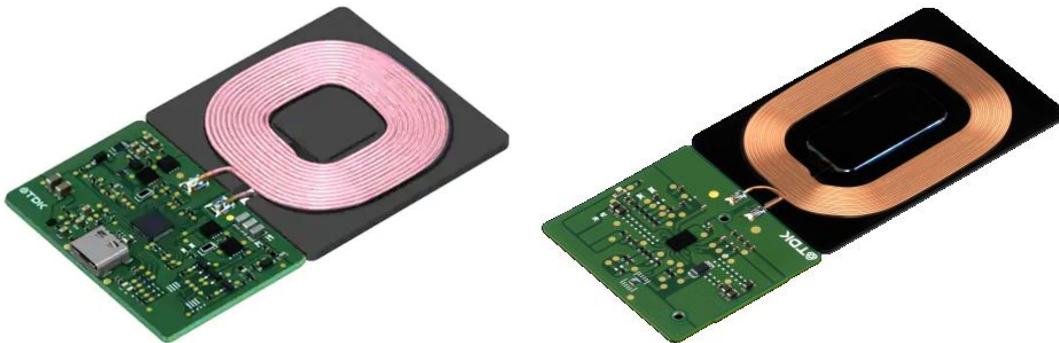
Typ přenosu	Účinnost	Vzdálenost přenosu	Frekvence přenosu	Efektivita přenosu
Indukční	nízká	(5 ÷ 10)mm	(110 ÷ 205)kHz	(60 ÷ 75)%
Mikrovlnný	střední	Až kilometry	2,45GHz ÷ 5,8GHz	(70 ÷ 80)%
Rezonanční	vysoká	(10 ÷ 50)mm	(1 ÷ 20)MHz	(70 ÷ 90)%

3.2.6. Existující komerční zařízení

TDK Tx-Rx Modules

Zařízení využívající elektromagnetickou indukci. Je potřeba vždy dvojice zařízení, tedy vysílací a přijímací jednotka (viz Obr. 16). Tyto jednotky obsahují cívku a vlastní obvod. Tmavá destička pod cívkou je z feritového materiálu, který slouží k odstínění elektromagnetické indukce do nežádoucího směru.

Výrobce nabízí širokou nabídku jak vysílacích, tak přijímacích jednotek různých velikostí a výkonů. Parametry zobrazené jednotky jsou vidět v Tab. 8.



Obr. 16 Zleva Tx vysílací jednotka WTM905525-12F2-12V-G a napravo Rx přijímací jednotka WRM483265-10F5-12V-G [22]

Tab. 8 Parametry přijímacího zařízení TDK [22]

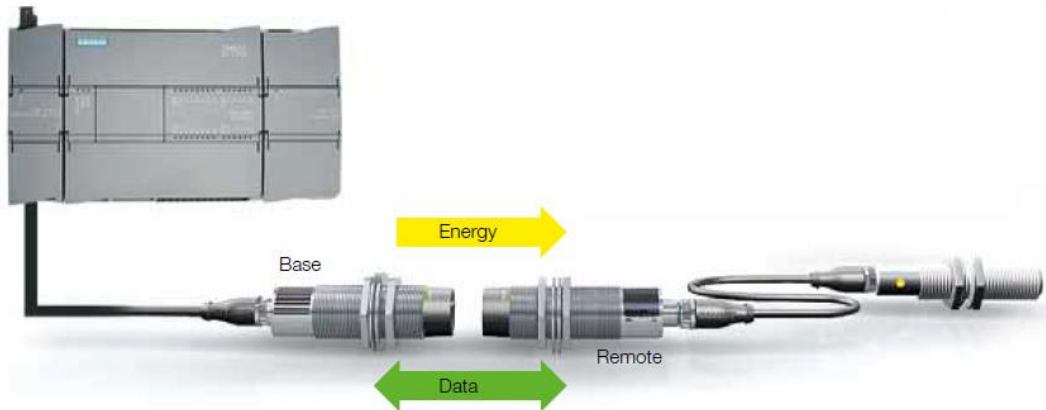
Model	Výstupní napětí [V]	Výstupní proud [A]	Výkon [W]	Účinnost [%]	Rozměry [mm]
WRM483265-10F5-12V-G	12	1,25	15	75	76,2x32,2x1,6

BALLUFF Inductive Couplers

Výrobce BALLUFF nabízí nejen zařízení pro bezdrátové napájení (viz Obr. 17), ale i napájecí zařízení schopná přenášet data (viz Obr. 18). Vše na principu elektromagnetické indukce. Zařízení pro přenos dat však nejsou schopná přenášet příliš vysoké proudy, maximálně 500mA. Výhodou těchto zařízení je jejich kompatibilita s řadou snímačů firmy BALLUFF. [23]



Obr. 17 Zleva zařízení BIC0008 a napravo zařízení BIC0076 [23]



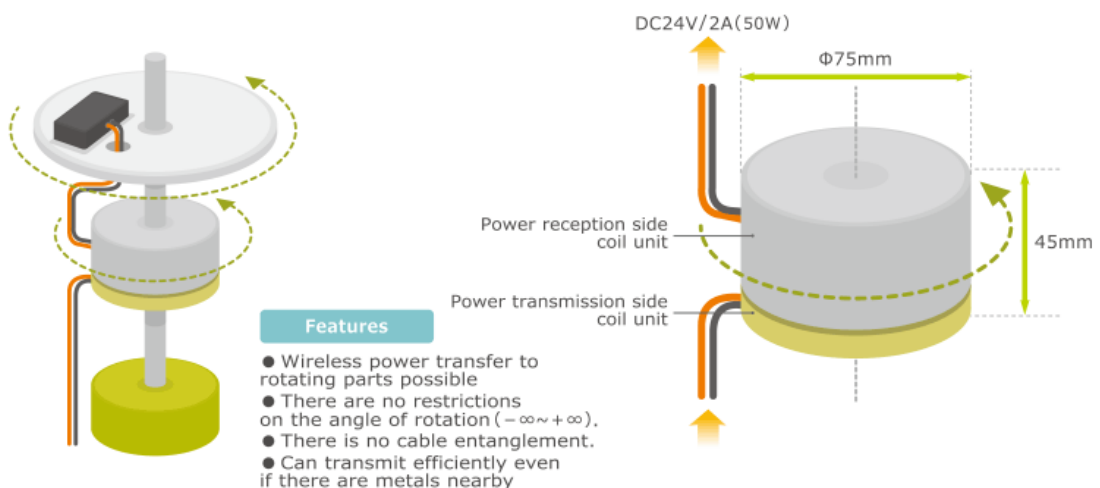
Obr. 18 Princip bezdrátového napájení a přenosu dat od firmy BALLUFF [23]

Tab. 9 Parametry zařízení BALLUFF [23]

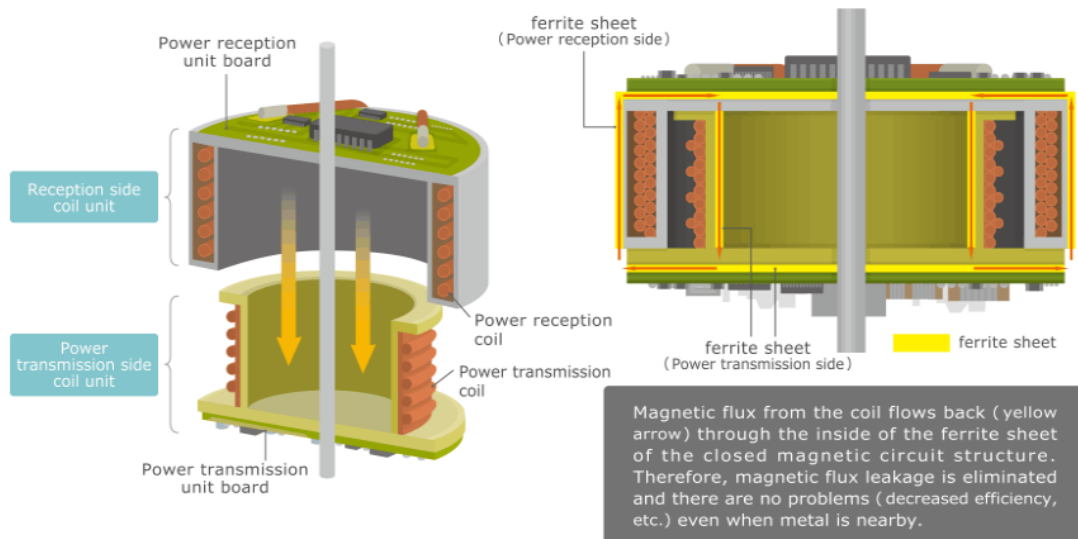
Model	Výstupní napětí [V]	Výstupní proud [A]	Výkon [W]	Účinnost [%]	Rozměry [mm]
BIC0008	24	0,5	12	-	∅28x106
BIC0076	24	5	120	-	120x120x45

TDK 50W WPT systém pro rotační části

Jedná se o vyvíjené zařízení (zatím tedy prototyp) od firmy TDK. Zařízení funguje na principu magnetické rezonance a je navrženo přímo pro bezdrátový přívod elektřiny pro rotační části strojů, robotů a podobných zařízení. Zařízení je konstruováno tak, že jeho magnetický tok je uzavřený a zapouzdřený feritovými deskami, které ho nepropustí ven (viz Obr. 19 a Obr. 20). Tím jsou chráněné a stíněné okolní části stroje včetně hřídele, nevzniká v okolí žádné Joulovo teplo a nesnižuje se účinnost vlivem vířivých proudů. [20]



Obr. 19 50W varianta WPT zařízení od firmy TDK [20]



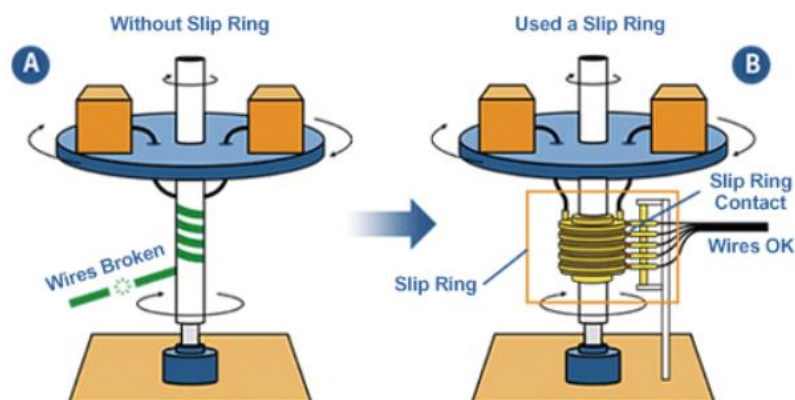
Obr. 20 Řez zařízením WPT 50W, uspořádání cívek [20]

3.3. Rotační přívod energie – sběrné kroužky

Elektromechanický přenos elektřiny z nepohyblivé součásti na rotující a naopak. Využívá stejného principu kontaktního přenosu jako kartáčové elektromotory, tedy že kartáč je v třecím kontaktu s komutátorem (viz Obr. 21). Jedná se o složitý přenos limitovaný několika aspekty. Největším problémem je opotřebení mechanických součástí a využitelnost omezená nízkými otáčkami. Maximální použitelné otáčky jsou nižší pro vyšší průměry kroužků/hřídel z důvodu vyšší obvodové rychlosti.

3.3.1. Klasické kontaktní sběrné kroužky

System skluzových ploch je řazen vedle sebe, podél osy hřídele. Na každý z kroužků je přitlačován kartáč, obvykle z uhlíku pro dobrou vodivost a nízké tření. Průměry jednotlivých sběrných ploch jsou stejné, tudíž by mělo být rovnoměrné i opotřebení jednotlivých dílců. Právě opotřebení je největší slabinou tohoto typu přenosu. [24]



Obr. 21 Princip sběrných kroužků [24]

3.3.2. Rtuťové kroužky

Rtutí smáčené kluzné kroužky, známé pro svůj nízký odpor a stabilní spojení, používají odlišný princip, který nahrazuje kontakt posuvného kartáče zásobou tekutého kovu, konkrétně rtuti, molekulárně vázaného na kontakty. Během otáčení udržuje tekutý kov elektrické spojení mezi stacionárními a rotujícími kontakty. Používání rtuti však představuje bezpečnostní riziko, protože se jedná o toxickou látku. Pokud aplikace sběrného kroužku zahrnuje výrobu nebo zpracování potravin, farmaceutického vybavení nebo jakékoli jiné použití, kde by kontaminace mohla být vážnou hrozbou, neměly by se tyto kroužky používat. Únik rtuti a výsledná kontaminace mohou být velmi závažné. [25]

3.3.3. „Pancake“ sběrné kroužky

Tento typ má skluzové plochy řazené kolmo na osu hřídele na plochém disku. Konfigurace tohoto typu má za následek vyšší hmotnost a nerovnoměrné opotřebení kartáčů. Výhodou je snížení délky zařízení. Tato zařízení se používají spíše než pro přenos energie pro přenos dat. [24]

3.3.4. Existující komerční zařízení

Mercotac

Firma mercotac vyrábí rtuťové sběrné kroužky. Použití rtuti místo klasických kontaktních kartáčů je náročnější na vnitřní uspořádání, proto většina rtuťových kroužků obsahuje pouze 1 až 4 vodiče (viz Obr. 22). Jejich výhodou jsou velmi nízké hodnoty odporu, dlouhá životnost, schopnost přenášet vysoké proudy a bezúdržbový chod. Přehled parametrů je vidět v Tab. 10. Žádný z rtuťových kroužků se nedělá s průchozím otvorem. [25]



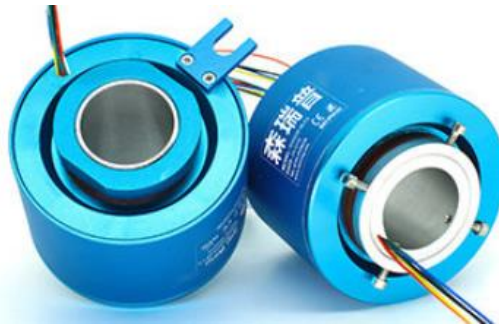
Obr. 22 Sběrný kroužek Model 230 [25]

Tab. 10 Parametry zařízení Mercotac [25]

Model	Počet vodičů	Napětí [V]	Proud [A]	Max. otáčky [ot/min]
Model 205	2	0 ÷ 250	30	1800

SenRing G series

Sběrné kroužky klasického typu s průchozím otvorem (viz Obr. 23). Tyto kroužky jsou navrhovány pro vysoké otáčky (viz Tab. 11), proto jsou vnější části vyrobeny z hliníkových slitin pro dobrý odvod tepla. U těchto kroužků existují i varianty, které jsou schopné přenášet další média jako stlačený vzduch nebo kapaliny. [26]



Obr. 23 Sběrný kroužek SenRing G series 12 [26]

Tab. 11 Parametry zařízení G series 12 Super High Speed [26]

Model	Počet vodičů	Napětí [V]	Proud [A]	Max. otáčky [ot/min]
12 SHS	12	0 ÷ 440	5	5000

MOFLON

Plochý sběrný kroužek od firmy Moflon se běžně využívá spíše pro přenos datových signálů než vyšších napájecích proudů. Některé jsou schopné přenášet data nebo nízké proudy až pro 48 vodičů. Konstrukce může být jak uzavřená nebo s průchozím otvorem, jako je model na Obr. 24. Zároveň dosahují výrazně menších otáček než předchozí typy (viz Tab. 12). [24]



Obr. 24 Sběrný kroužek MP310 Series [24]

Tab. 12 Parametry zařízení MP310 Series [24]

Model	Počet vodičů	Napětí [V]	Proud [A]	Max. otáčky [ot/min]
MP310 Series	2 ÷ 12	0 ÷ 440	2 ÷ 24	200

3.4. Generování elektrického proudu přímo na vřetení

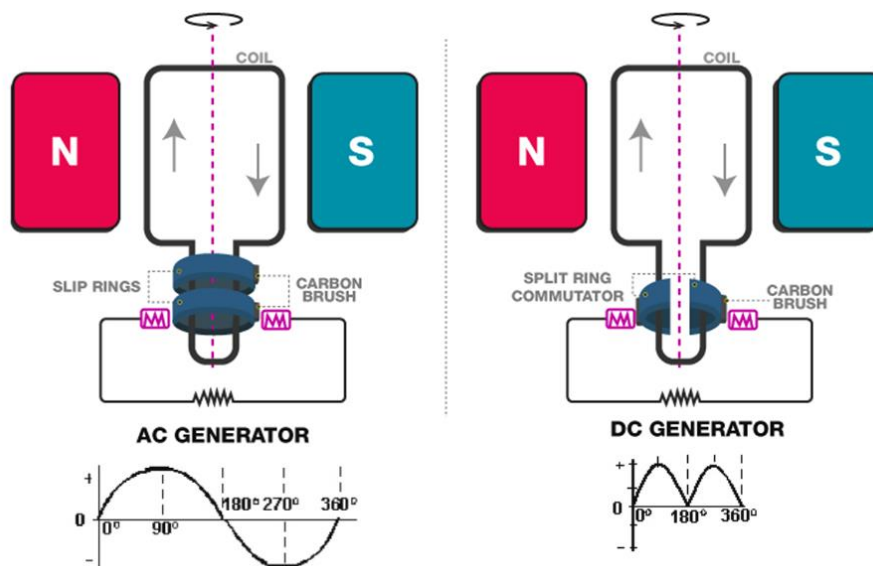
Motivací využití generátoru je získání stabilního zdroje elektrického proudu na rotujícím vřetení, který by nebyl závislý na okolních podmínkách, jako třeba vibrace.

Správná aplikace generátoru na vřeteno by mohla představovat elegantní způsob, jak napájet bezdrátové snímače. Generátor by bylo možné aplikovat na existující rotační části nebo ho dodatečně integrovat jako přídavné zařízení.

3.4.1. Dynamo

Dynamo se skládá se ze statoru, ve kterém je statické magnetické pole a z rotoru na kterém je primární vinutí. Magnetické pole na statoru může být vytvářeno permanentními magnety nebo elektromagneticky (vinutí pod proudem). Změnou magnetického pole vlivem rotace rotoru se ve vinutí indukuje elektrický proud, který je odváděn přes sběrné kroužky neboli komutátor a uhlíkové kartáče.

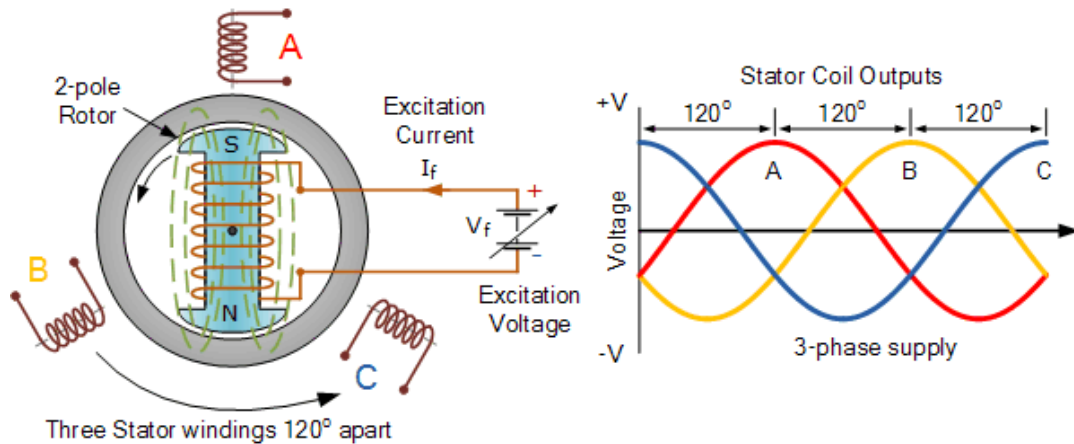
Může produkovat jak stejnosměrný, tak střídavý proud (viz Obr. 25). Záleží jen na způsobu zapojení komutátoru a kartáčů.



Obr. 25 Rozdíl mezi střídavým a stejnosměrným zapojením [27]

3.4.2. Alternátor

Principem je alternátor velmi obdobný dynamu. Zásadní rozdíl je v tom, že zde rotuje magnetické pole, zatímco primární vinutí se nachází ve statoru (viz Obr. 26). Opět může být magnetické pole generováno jak permanentními magnety, tak elektromagneticky pomocí dalšího vinutí. Kvůli tomuto uspořádání produkuje alternátor pouze střídavý proud.



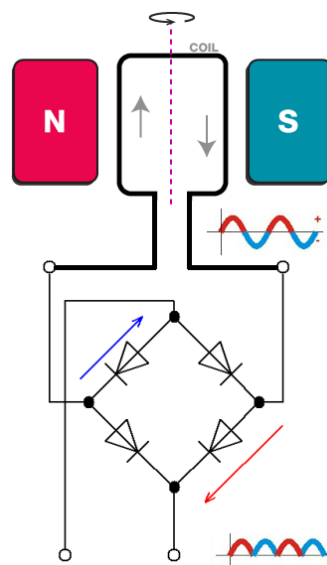
Obr. 26 Princip 3-fázového alternátoru [28]

3.4.3. Vlastní řešení integrace generátoru

V rámci rešerše nebyla na trhu (k datu 25.2.2020) nalezena zařízení, která by byla určena pro napájení dílců na jakýchkoliv rotačních částech. Pro tuto variantu je potřeba navrhnout vlastní generátor se specifickým zapojením.

Nejvhodněji se proto jeví stejná konstrukce, jakou má dynamo, ale s drobnými úpravami. Jelikož je potřeba napájet snímače na rotujícím vřeteni, je výhodné zapojení, kdy se proud generuje na rotujícím vinutí. Zároveň není potřeba kartáčů a komutátoru, které by elektrický proud sbíraly z vinutí – jedná se o bezdrátové a bezkontaktní zapojení.

Po odstranění komutátoru a kartáčů se bude na výstupu rotorového vinutí generovat pouze střídavý proud, který bude potřeba usměrnit například pomocí diodového usměrňovače. Jeho základní návrh zapojení je vidět na Obr. 27. Jinými slovy není třeba odvádět generované napětí zpět z rotoru generátoru, jen bude usměrněno a vedeno dále do vřetene, kde bude napájet snímače.



Obr. 27 Usměrnění střídavého zdroje generátoru

4. Rozbor požadavků a vyhodnocení řešerše

4.1. Oblasti řešení a zaměření práce

Kromě zadaných parametrů napájení snímačů a komunikačních kanálů je třeba brát v potaz několik dalších vlivů a okolností, podle kterých je potřeba zvolit vhodné řešení. Předpokládá se, že oblastí použití bezdrátových systémů mohou být obráběcí stroje se složitými nebo výsuvnými vřeteny či velké stroje, u kterých je předpoklad větších deformací konstrukce při chodu stroje.

Zajímají nás systémy, které jsou aplikovatelné pro náročný několikahodinový provoz na strojních částech. Protože se hledá primárně náhrada za mechanické sběrné kroužky, je kladen důraz na spolehlivost systému, bezúdržbovost a dlouhou životnost bez ohledu na prostředí, ve kterém bude systém pracovat.

4.2. Vhodnost nalezených řešení

Pro výběr napájecího systému byla zvolena tato kritéria:

- Produkováný proud a napětí
- Provozní otáčky
- Stálost a stabilita systému
- Dostupnost na trhu
- Možnost systému aplikovat na vřeteno
- Životnost

Vedlejší kritéria:

- Malé rozměry a hmotnost
- Snadná aplikace na další rotační části strojů

Vybraný systém je možné aplikovat pouze na přírubu vřetene. Samotné vřeteno není možné upravovat. Konkrétně se napájecí zařízení musí vejít do mezikruží příruby, které je vymezeno průměry $\varnothing 95$ a $\varnothing 60$. Všechna zvolená kritéria a podmínky pro napájecí systémy jsou shrnuta v Tab. 13.

Tab. 13 Srovnání možností napájení rotačních částí stroje

	Produkováný výkon	Provozní otáčky	Stabilita napájení	Dostupnost na trhu	Aplikovatelnost na vřeteno	Životnost	Rozměry a hmotnost	Aplikovatelnost na další rotační části strojů
Piezelektrické články	--	+	-	++	-	+	++	-
Elektromagnetický přenos	-	+	-	++	+	++	+	+
Elektrostatický přenos	--	+	-	--	-	+	+	-
Indukční přenos	+	++	+	++	++	++	++	++
Mikrovlnný přenos	+	+	+	--	--	/	--	-
Magnetická rezonance	++	++	++	--	++	++	+	++
Sběrné kroužky	++	-	++	+	+	-	++	++
Generátor	++	++	+	-	+	++	-	+

4.2.1. Nepoužitelné systémy

Rekuperační systémy

U všech nalezených rekuperačních vibračních systémů je nedostatek dodávaného výkonu. Tyto vibrační rekuperátory jsou použitelné pro mikrosystémy, kde není potřeba tak vysokých proudů a napětí. Nicméně žádný ze zmiňovaných generátorů neprodukuje více než 0,3W z celkově potřebných 5,5W.

Mikrovlnný přenos

Zařízení jsou spíše laboratorního a prototypového charakteru. Proto v době zpracovávání rešerše nebyla nalezena žádná dostupná zařízení na trhu. Zároveň jsou tato zařízení velkých rozměrů a obtížně aplikovatelná na rotující části strojů.

Magnetická rezonance

Existují prototypová zařízení navrhovaná speciálně pro přenos napětí na rotačních částech, ale aktuálně ještě nejsou uvedeny na trh (k datu 18.1.2020), viz zmiňované zařízení od firmy TDK (kapitola 3.2.6.). Teoreticky se tedy jedná o vhodný systém pro bezdrátové napájení snímačů na rotačních částech stroje, ovšem v tuto chvíli není komerčně dostupný.

4.2.2. Nevhodné systémy

Sběrné kroužky

Metoda kontaktního přenosu. Tato zařízení by se použila, pokud by se nenašel žádný vhodný systém bezdrátového přenosu. Hlavním důvodem, proč nevyužít sběrné kroužky, je vyšší opotřebení a nespolehlivost. Zároveň se na trhu nevyskytuje velké množství sběrných kroužků velkých rozměrů, které by byly schopny provozu za vysokých otáček. Jedná se o levnou metodu, která je komerčně dostupná a s letitou zkušeností. Avšak jedním z cílů této práce je se sběrným kroužkům vyhnout a najít vhodnější metodu.

4.2.3. Vhodné systémy

Indukční přenos energie

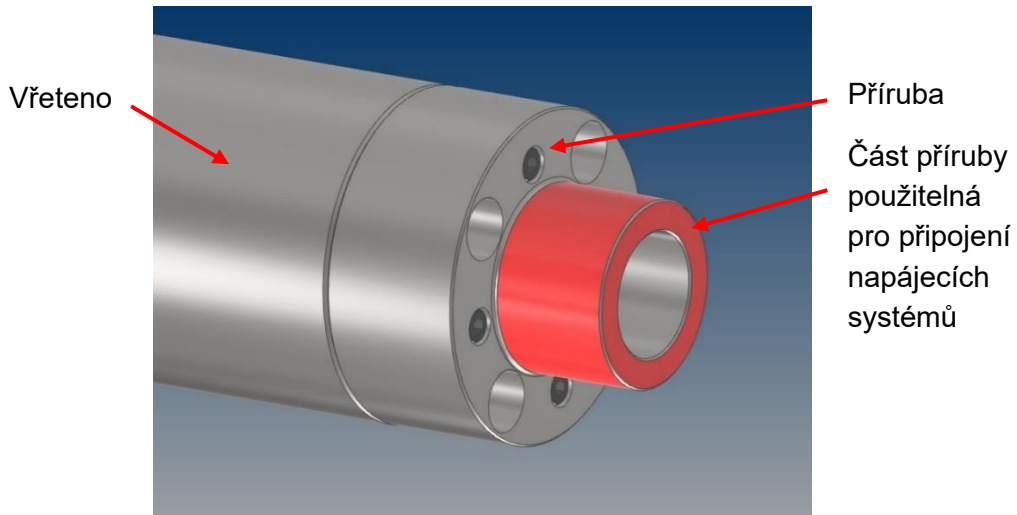
Zařízení existující na trhu produkují dostatečný výkon a jsou dobře aplikovatelná pro výrobní stroje dle výše zvolených kritérií. Díky přenosu přes vzduchovou mezeru zde není žádné opotřebení, zařízení jsou bezúdržbová a nejsou omezena rychlostí, konkrétně otáčkami.

Generování el. proudu přímo na vřetení

Tento mechanismus poskytuje stálý a stabilní zdroj energie, která je dostatečně vysoká pro napájení velkého množství snímačů. Je potřeba některé části generátoru vyrobit na míru pro vřetení nebo minimálně upravit kupovaný generátor. Přesto ho jeho stabilita a výkonnost řadí mezi vhodné systémy pro napájení snímačů na vřetení. Potřeba rotace pro generování proudu a napětí by mohla tento systém omezovat.

5. Varianty řešení

Pro napájení snímačů na vřetení je možné využít pouze prostor na přírubě vřetene, ideálně čelo a obvod osazení (viz červeně zvýrazněná část příruby na Obr. 28). Zbylé části příruby je potřeba zanechat přístupné kvůli montáži a vedení kabeláže (viz výrobní výkres v příloze č.1).



Obr. 28 Příruba vřetene

5.1. Sběrné kroužky

Při výběru vhodného kroužku byly nejvíce limitujícími faktory životnost, provozní otáčky (min. 3000ot/min) a průchozí otvor (min. $\varnothing 50\text{mm}$). Sběrné kroužky běžně dostupné na trhu totiž zpravidla nepřesáhnou provozní limit 1000ot/min a jejich životnost bývá desítky výjimečně stovky miliónů otáček. Pro všechna tato kritéria bylo nalezeno na trhu jen malé množství produktů.

Z nalezených sběrných kroužků byl jako nejvhodnější zvolen model GHS50119 (viz Obr. 29) od firmy Moflon. Zvolený model má limit otáček 8000ot/min (viz Tab. 14). Při chodu rychlostí 3000ot/min bude jeho životnost pouze 1667hod. Pro běžnou osmihodinovou pracovní směnu by bylo potřeba sběrný kroužek měnit přibližně každých 8 měsíců. Tím se ze sběrného kroužku stává téměř spotřební zboží a není reálné takovou součást použít. Mimo nízkou životnost kroužku je také odrazující jeho cena: 21 000 Kč. [24]



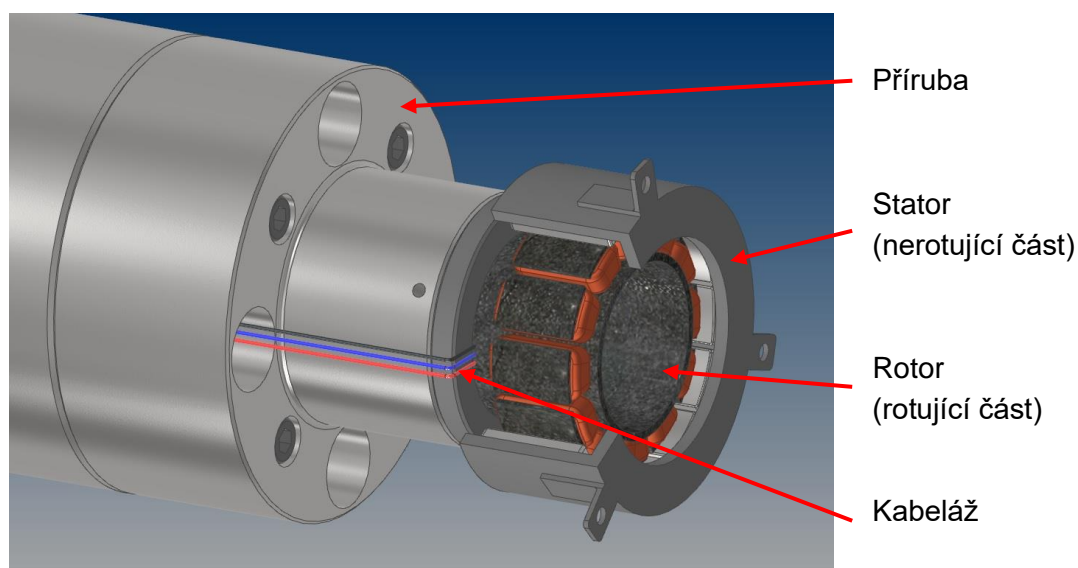
Obr. 29 Zvolený sběrný kroužek s průchozím otvorem od firmy Moflon [24]

Tab. 14 Parametry zvoleného sběrného kroužku [24]

Model	Počet vodičů	Napětí [V]	Proud [A]	Max. otáčky [ot/min]	Životnost [ot]	Rozměry [mm]	Průchozí otvor [mm]
GHS50119	2	0 ÷ 690	10	8000	300 mil.	Ø119x43,6	Ø50

5.2. Generování elektrické energie přímo na vřetení

Tato varianta uvažuje rotor s primárním vinutím generátoru připevněný na čele příruby a stator tvořený permanentními magnety jako statický, připevněný k rámu stroje. Idealizovaný model je vidět na Obr. 30.



Obr. 30 Návrh uložení generátoru na čelo příruby

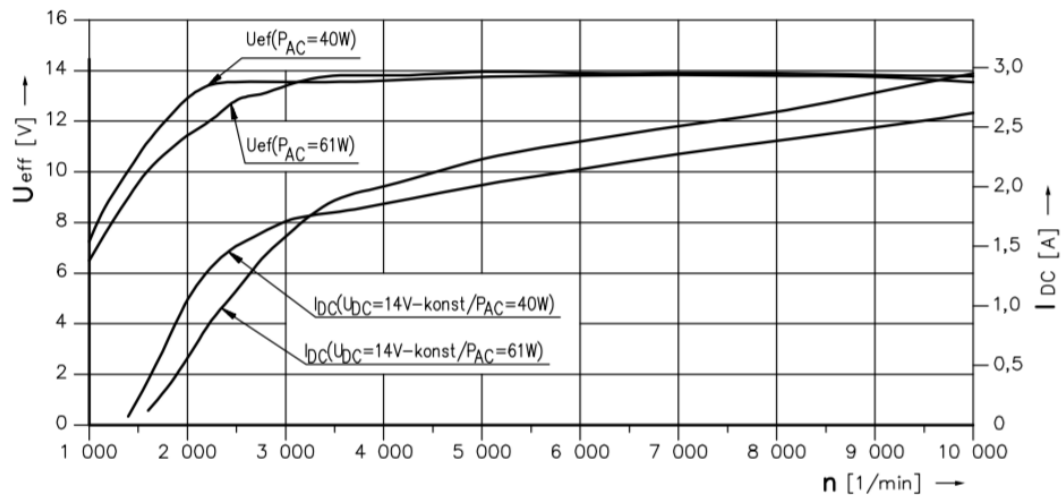
Jako nejvhodnější komerční řešení byl zvolen 3-fázový alternátor SZ10 od firmy VAPE. Skládá se z rotoru s permanentními magnety (sekundární část) A70R-3 (viz Obr. 31) a statoru s vinutím (primární část) A70S-3 (viz Obr. 32). Tento alternátor byl vybrán pro malé rozměry a výhodné konstrukční uspořádání.



Obr. 31 Rotor A70R-3 [29]



Obr. 32 Stator A70S-3 [29]



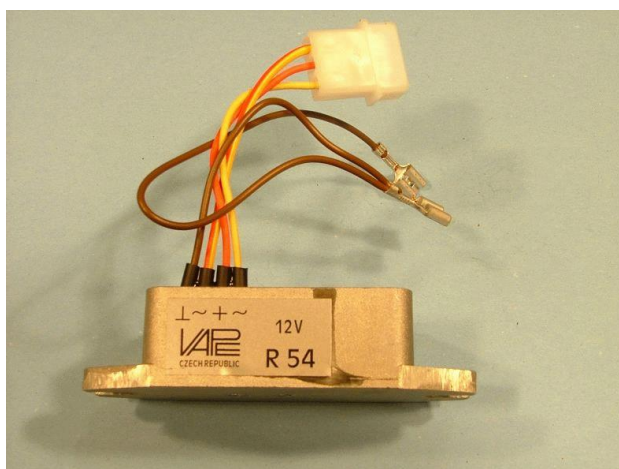
Obr. 33 Charakteristika proudu a napětí v závislosti na otáčkách alternátoru [29]

Pro napájení snímačů ve vřetení musí být zvolený alternátor mechanicky namontován opačně, než je běžné. Tedy primární část s vinutím bude připevněna na přírubě rotující části, odkud dále povede kabeláž k regulátoru (viz Obr. 34), který usměrní indukované napětí na požadovaných 12V a sekundární část s permanentními magnety bude připevněna ke konstrukci stroje jako stator. Aby bylo možné alternátor takto použít, je třeba na něm provést několik úprav, zejména vyvrtání otvorů pro připevnění tímto nestandardním zapojením.

Tab. 15 Parametry alternátoru SZ10 [29]

Model	Výstupní napětí při 3000ot/min [V]	Proud při 3000ot/min [A]	Max. otáčky [ot/min]	Rozměry [mm]	Průchozí otvor [mm]
SZ10	12	1,7	10 000	Ø110x56	Ø10,5

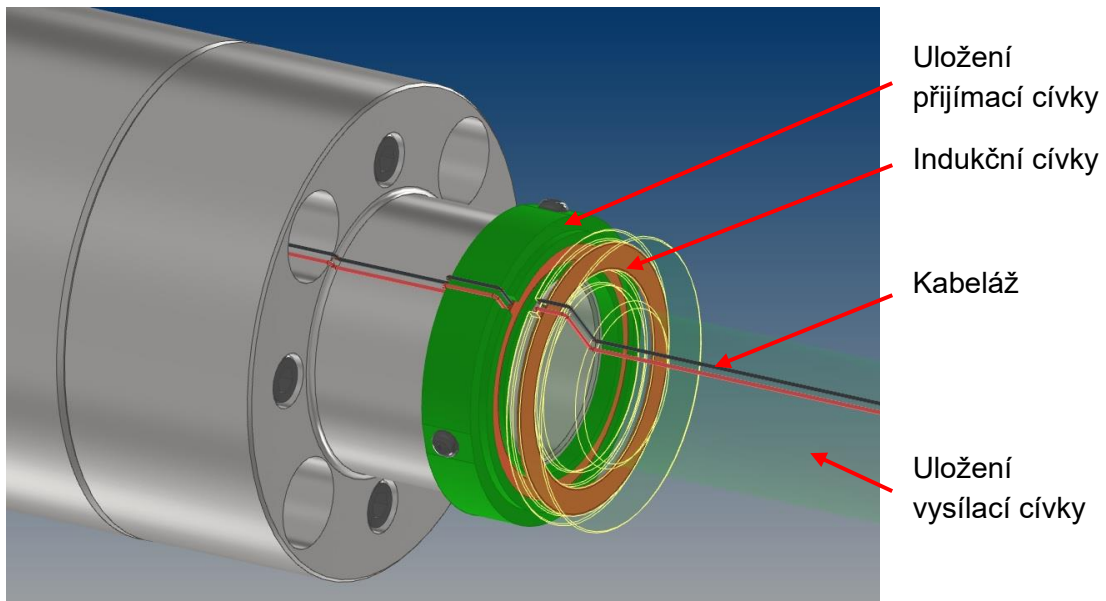
Tato varianta je vhodná, pokud se nebude požadovat velký průchozí otvor ve středu alternátoru (například pro kuličkový šroub). Jedná se o bezkontaktní způsob napájení bez jakéhokoliv opotřebení vlivem tření, které se vyskytuje u sběrných kroužků. Alternátor při 3000ot/min poskytuje dostatek energie pro napájení snímačů ve vřetení (viz Tab. 15). Cena alternátoru s regulátorem je 4 340 Kč. [29]



Obr. 34 Regulátor R54 pro alternátor SZ10 [29]

5.3. Indukční přenos energie

U varianty s indukčními cívkami je navrženo uložení cívek na čele příruby. Vysílací cívka bude napevno připojena ke konstrukci a přijímací cívka na přírubě (viz Obr. 35). Obě cívky budou uloženy v plastovém přípravku. Konkrétnímu uložení a přípravku se bude věnovat kapitola 6.



Obr. 35 Návrh uložení indukčních cívek na čele příruby

Pro indukční přenos bylo zvoleno zařízení Taidacent 12V 2A Wireless Power Supply Module. Jedná se o zařízení využívající indukční přenos od firmy Shenzhen Taida Century (viz Obr. 36). Zařízení se skládá ze dvou částí: vysílací cívky a přijímací cívky. Každá z těchto cívek má vlastní elektronický obvod (viz příloha č. 2), který zajišťuje správnou funkci přenosu. Výrobce doporučuje minimální odsazení cívek 8mm, jinak by mohlo docházet k přehřívání vlastních obvodů cívky. Na Obr. 37 je vidět proudová charakteristika v závislosti na velikosti odsazení cívek. Rozměry a parametry tohoto modulu jsou vidět v Tab. 16 a Tab. 17 [30]

U indukčního přenosu nedochází k opotřebení, zvolené zařízení není třeba jakkoliv upravovat, je snadno aplikovatelné na přírubu vřetene a jeho cena je 720 Kč. Pro tyto vlastnosti byla zvolena varianta s indukčními cívkami jako ta nejnvhodnější.

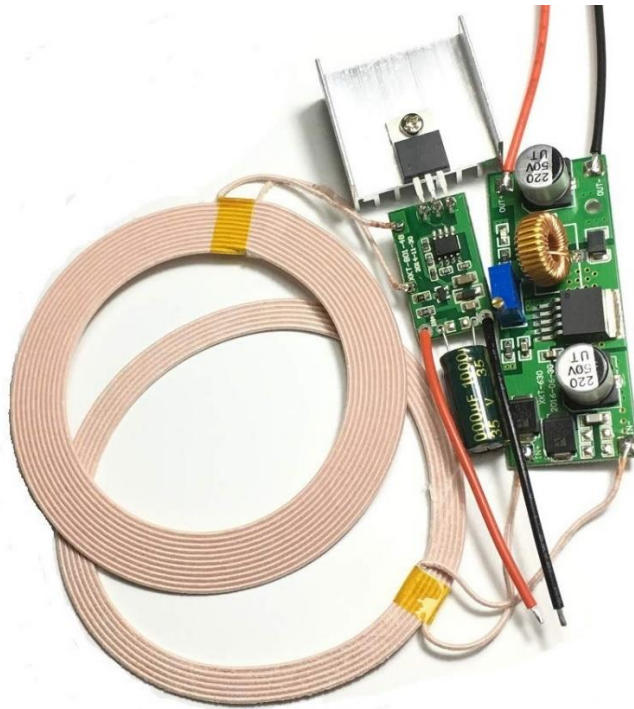
Tab. 16 Rozměry modulu Taidacent 12V 2A [30]

	Vysílací cívka	Přijímací cívka
Vnější průměr [mm]	Ø88	Ø83
Vnitřní průměr [mm]	Ø70	Ø70
Tloušťka [mm]	1,3	1,3
	Vysílací modul	Přijímací modul
Rozměry [mm]	17x28x4	25x64x16
Celková hmotnost [g]	24	33

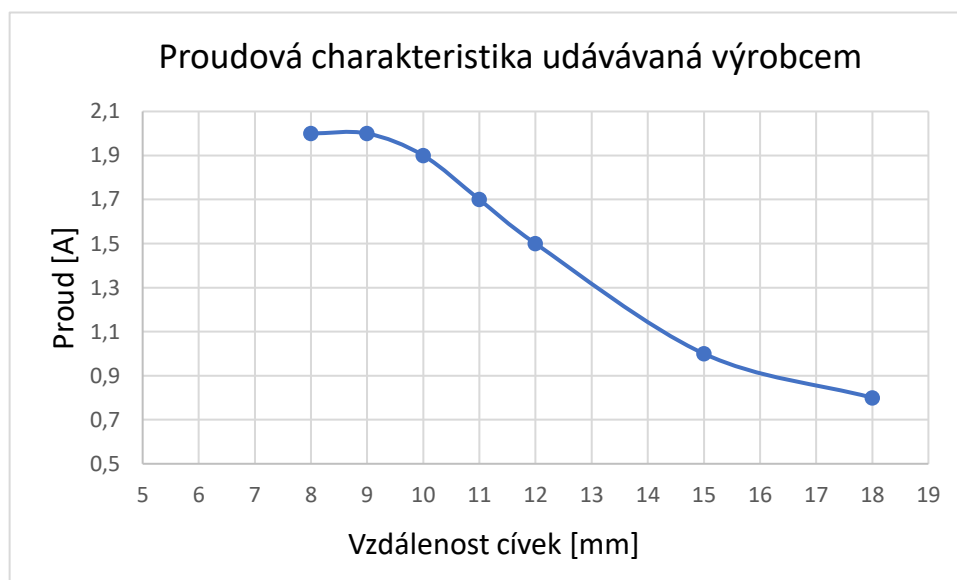
Tab. 17 Parametry modulu Taidacent 12V 2A [30]

Vstupní napětí	24V
Maximální vstupní proud	2A
Výstupní napětí	12V
Maximální výstupní proud	2A

Z Tab. 17 vyplývá, že v ideálním stavu by indukční cívky měly mít celkovou účinnost 50%. Zbytek energie je ztrátový. Tato účinnost je velmi malá, je to daň za bezdrátový přenos.



Obr. 36 Vysílací a přijímací modul Taidacent 12V 2A Wireless Power Supply Module [30]



Obr. 37 Velikost přeneseného proudu v závislosti na vzdálenosti udávaná výrobcem [30]

6. Realizace a testování zařízení

6.1. Konceptní návrh testu indukčních cívek

Jako napájecí systém byly zvoleny indukční cívky. Tyto cívky nejsou určeny pro napájení elektronických součástí za rotace. Proto cílem této kapitoly je navrhnout konceptní test, který prokáže schopnost cívek napájet skupinu elektrických zařízení uložených ve vřeteni stroje a bude sledovat vliv rotace a velikosti vzduchové mezery mezi cívkami na přenášený výkon. Následující text popisuje konceptní návrh testu včetně elektrického zapojení, konstrukci měřicího přípravku pro uložení cívek a průběh samotného měření.

6.1.1. Koncepte elektrického zapojení

Nahrazení snímačů

Zařízení uložená ve vřeteni stroje, které je potřeba napájet:

- Snímače teploty: 3,3V (1W)
- Snímač polohy: 5V (0,75W)
- CAN-WiFi: 9 až 40V (4,2W)

Výše zmíněné parametry napájených zařízení platí pro jednotlivé okruhy a jedná se o katalogové hodnoty, které se od reálných mohou lišit. Bylo provedeno měření pro zjištění reálných hodnot:

Při napětí 12V byl naměřen proud 0,35A, tedy 4,2W (viz Ohmův zákon).

Snímače a další zařízení uložené ve vřeteni nelze pro účel testování vyjmout a zároveň není možné provádět měření na samotném vřeteni. Proto bylo potřeba zvolit metodu měření, která ověří napájecí funkci cívek bez použití těchto konkrétních zařízení. Pro tyto účely byla z vřetene odšroubována samotná příruba, ke které bude mechanicky namontovaný nástavec pro uložení cívky a bude měřen přenos mezi rotující přírubou a konstrukcí (viz kap. 6.1.2.).

Jako náhrada za sadu snímačů a komunikačního kanálu WiFi byl navržen vhodný rezistor, který by se parametry co nejvíce přiblížil k původní sadě. Toto nahrazení není ideální, protože u snímačů a WiFi komunikace může docházet k výkyvům příkonu. Proto bylo zvoleno více rezistorů s různými hodnotami (viz kap. 6.1.3.). Tyto okruhy mají jednotný 12V přívod napájení. Jako vhodná náhrada byl tedy zvolen keramický drátový rezistor RD 33R 10W (viz Tab. 18).

Tab. 18 Porovnání parametrů snímačů a rezistorů

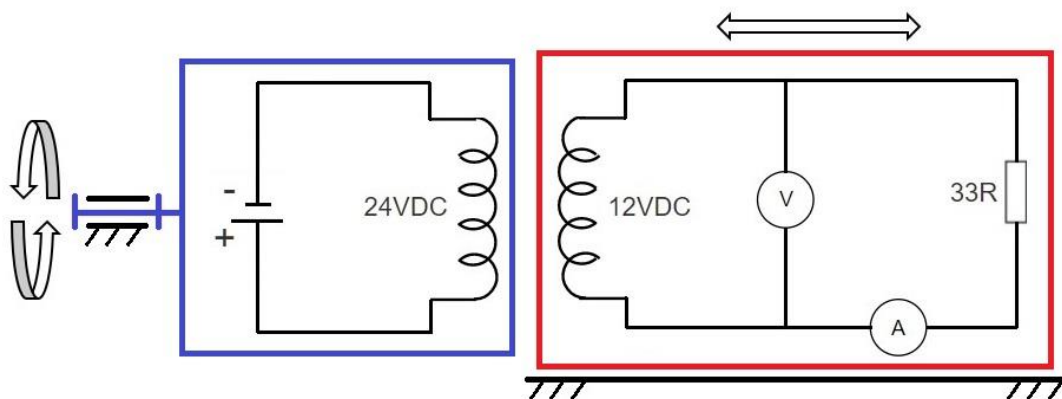
	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [W]
Spotřeba skutečných snímačů na vřeteni	12	0,35	4,2
Hodnoty nahrazení rezistorem 33R	12	0,364	4,37

Výkon: $P = I \cdot U$ (1)

Ohmův zákon: $I = \frac{U}{R}$ (2)

Koncepce elektrického zapojení pro měření přenosu cívek

Pro ověření funkce systému napájení bude příruba vřetene s potřebnou elektronikou a akumulátorem upnuta do sklíčidla konvenčního soustruhu. Je výhodnější jako zdroj zvolit právě akumulátor a rotovat s ním a vysílací cívkou, protože pak můžeme jednoduše měřit napětí a proud na přijímací části. Měřit napětí a proud na rotační části, a ještě data odečítat nebo přeposílat, by bylo významně složitější. Na rotující přírubě bude uložena vysílací cívka (modrý blok na Obr. 38). Naproti bude v koníku uložena přijímací cívka (červený blok na Obr. 38), ta bude vykonávat posuvný pohyb. Poté při požadovaných otáčkách proběhne měření. Měřit se bude efektivita přenosu indukčních cívek v závislosti se zvětšující se vzduchovou mezerou a bude se sledovat vliv otáček na přenos energie.



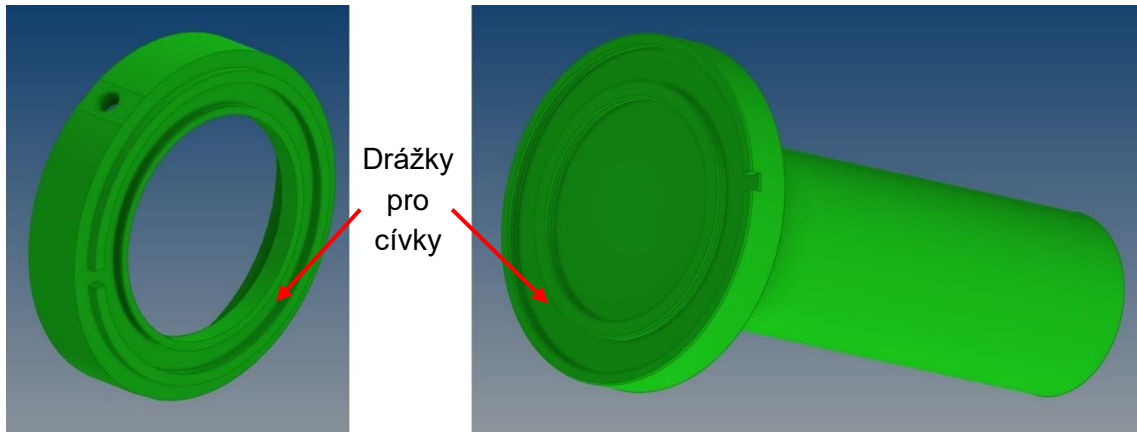
Obr. 38 Schématické zobrazení elektrického zapojení

6.1.2. Konstrukce nástavce pro uložení cívek

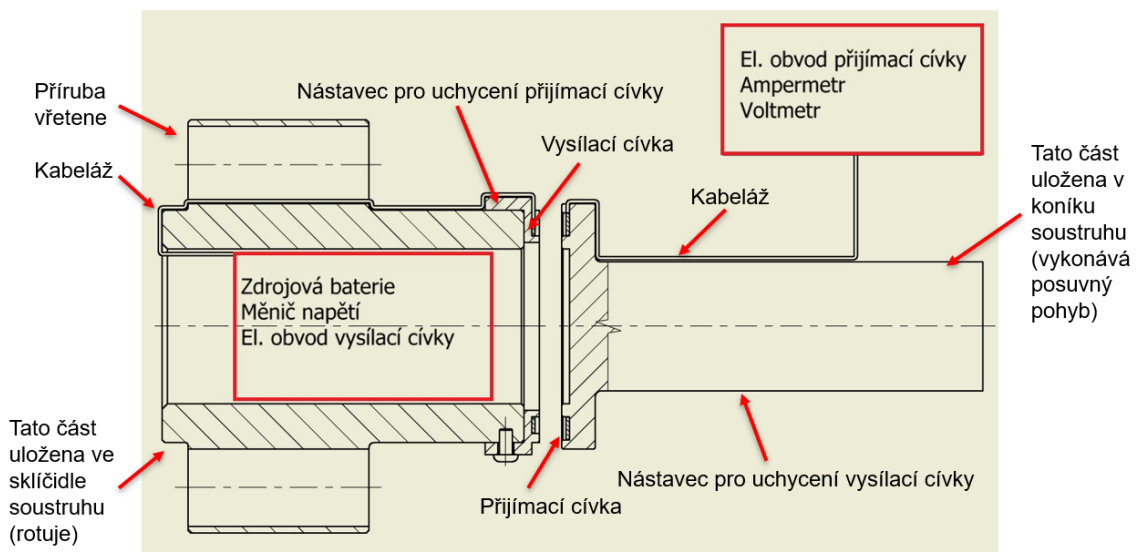
Základní nástavce pro cívky se vyrobí pomocí 3D tisku (viz Obr. 39). Oba nástavce budou mít v sobě drážku, do které se cívky vloží. Detailnější schéma uložení je vidět na Obr. 40.

Cívky jsou měkké a není v principu žádoucí, aby přišly do kontaktu s kovovými předměty, které by mohly ovlivnit jejich efektivitu, proto nepřipadá v úvahu tyto cívky přišroubovat.

Pro jejich připevnění k nástavci a zároveň jako ochrana proti poškození je zvolena zalévací hmota na elektronické součástky GPH ZH-PUR 250, která má dobré adhezní vlastnosti. Hmota je na bázi dvousložkové polyuretanové pryskyřice, která se po promíchání obou složek vylije do drážky nástavce, kde je uložena cívka a poté nechá vytvrdit. Dle výrobce je doba zpracovatelnosti této hmoty už po 15min a doba úplného vytvrzení trvá 2-3 dny. Stejná hmota se použije na zalití vlastních elektrických obvodů přijímací cívky, aby vlivem rotace nedocházelo k vytrhávání tištěných spojů. [31]



Obr. 39 Vlevo nástavec pro uložení vysílací cívky a vpravo nástavec pro přijímací cívku

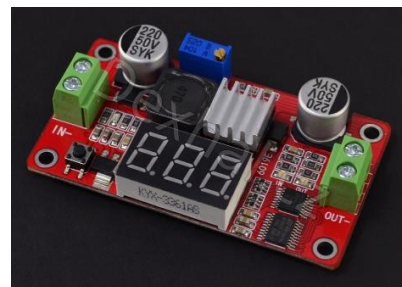


Obr. 40 Schéma uložení dílčích prvků testu

V přírubě bude uložen napájecí akumulátor s napětím 7,4V a kapacitou 5000mAh (viz Obr. 41). Li-Po akumulátory nemají výstupní napětí zaokrouhlené na celá čísla. Hodnoty napětí jsou dány počty článků uvnitř baterie. Existují akumulátory s hodnotami 22,2V, ty by se ale už nevešly do středu přírubby. Proto byla zvolena menší a tenčí verze s napětím 7,4V doplněná o napěťový měnič 5A Step-Up DC/DC od firmy Dexhal (viz Obr. 42), který bude nastaven nastaví na 24V.



Obr. 41 Napájecí LiPo baterie 11,1V [32]



Obr. 42 Měnič napětí Dexhal [33]

6.1.3. Měření a sběr dat

Přijímací cívka bude napojená na zvolený rezistor, na kterém se bude měřit napětí a proud. Pro pokrytí možnosti zvýšené spotřeby snímačů bude provedeno několik měření pro sérii rezistorů s různými hodnotami odporu (viz Tab. 19). Rezistor 33R byl zvolen jako náhrada snímačů při ideálních podmínkách. Rezistory 27R a 22R simulují situaci, kdy dojde ke zvýšení příkonu. A rezistor 12R slouží pro ověření mezních hodnot, které jsou cívky schopné přenést. Nejdříve proběhne série měření bez rotace, která bude sloužit jako referenční. Konkrétně se bude měřit pouze závislost efektivity přenosu na vzdálenosti cívek. Poté se provede měření při 1500ot/min a nakonec při 3000ot/min. Všechny hodnoty se poté zpracují a porovnají. Výsledek by měl jasně prokázat, jak moc velký vliv mají otáčky na elektromagnetický přenos pomocí indukčních cívek.

Tab. 19 Hodnoty příkonů pro jednotlivé rezistory

Rezistor	33R	27R	22R	12R
Simulovaný příkon [W]	4,36	5,33	6,55	12

6.1.4. Napájení reálných snímačů pomocí indukčních cívek

Pro použití indukčních cívek na zadaném vřetení je potřeba navrhnout vhodný měnič napětí pro snímače s nižším napětím než 12V. Byl zvolen 3A Step-Down DC/DC měnič od firmy Dexhal (viz Obr. 43). Rozsah výstupního napětí je nastavitelný od 1,25V do 30V s přesností 0,05V a špičkový výstupní proud je 2A. Jeden měnič bude použit pro snímače polohy, které požadují 3,3V a druhý pro snímače teploty, které požadují 5V. Komunikační kanál WiFi lze napájet 12V. Výhodou tohoto měniče je jeho nezávislost výstupu na vstupu. Měnič udržuje na výstupu nastavené napětí nezávisle na změnách vstupního napětí. [34]



Obr. 43 3A Step-Down DC/DC měnič napětí [34]

Během napájení snímačů indukčními cívkami se může stát, že dojde k nečekanému výpadku napájení nebo zvýšené spotřebě energie, kterou cívky nedokážou pokrýt. Pro tuto variantu by měl napájený systém obsahovat záložní zdroj energie, který by takový dočasný výpadek dokázal pokrýt. Jedna možnost je použít lithium-iontový nebo lithium-polymerový akumulátor. Jejich výhodou je vysoká kapacita, ale mají nízkou životnost. Jejich životní cyklus je většinou okolo 500 až 1000 nabití a během tohoto cyklu dochází ke ztrátě kapacity akumulátoru.

Druhá možnost je použití superkondenzátoru. Oproti klasickým elektrolytickým kondenzátorům mají výrazně větší kapacitu. Tyto superkondenzátory mají velmi dlouhou životnost – ta může dosahovat až 1 milionu nabití. Zároveň u nich nedochází k takovému úbytku kapacity jako u akumulátorů. Pro aplikaci, kde je potřeba mít rezervu napájení, která je spíše krátkodobého charakteru a jsou na ní kladeny nároky na vysokou životnost a bezúdržbovost, je superkondenzátor vhodnější volbou. [35, 36]

Jako vyrovnávací zdroj energie byly zvoleny dva stejné sériově zapojené superkondenzátory KR-5R5V155-R (viz Obr. 44). Jeden superkondenzátor má kapacitu 1,5F a napětí 5,5V. Dohromady mají napětí jen 11V, ale díky vlastnosti měniče, kdy je výstup nezávislý na vstupu, budou snímače napájeny stabilním napětím. WiFi komunikace požaduje napětí v rozsahu 9 až 40V, zde je tedy napětí 11V také dostačující. [37]

Pokud by došlo k úplnému výpadku, budou superkondenzátory schopny dodávat výkon 4,2W po dobu 21,6 vteřin (viz rovnice 3 a 4). Nicméně takový výpadek se nepřepokládá, tyto superkondenzátory jsou zamýšleny spíše jako vyrovnávací zdroj pro udržení konstantního napájení při špičkách a výchylných.

Výpočet výkonu z energie:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{0,5 \cdot C \cdot U^2}{t} \quad (3)$$

Výpočet doby napájení výkonem 4,2W:

$$t = \frac{0,5 \cdot C \cdot U^2}{P} = \frac{0,5 \cdot 1,5 \cdot 11^2}{4,2} = 21,6s \quad (4)$$

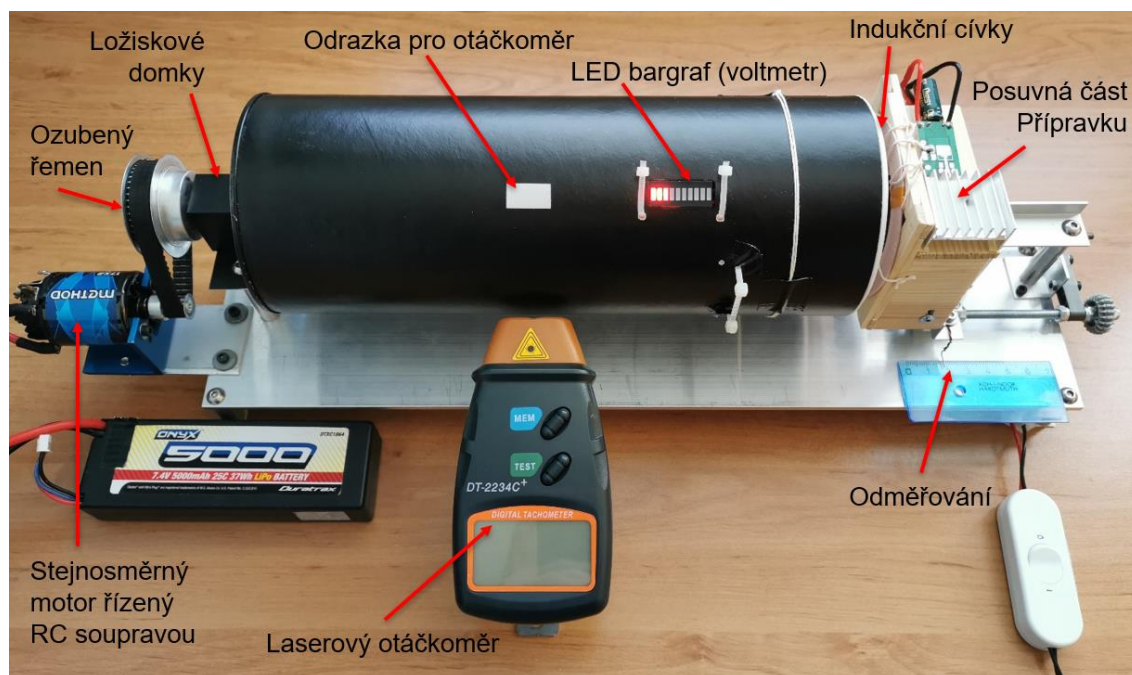


Obr. 44 Superkondenzátor KR-5R5V155-R [37]

6.2. Ověření funkce indukčních cívek na provizorním testovacím zařízení

Kvůli problémům vzniklým pandemií viru Covid-19 byl uzavřen přístup do univerzitních laboratoří (od 10.3.2020 do 25.5.2020) a nemohl být proveden navrhovaný experiment. Jako náhrada bylo zvoleno alternativní měření vybraného komerčního zařízení v domácích podmínkách. Cílem měření na tomto zařízení je prokázat schopnost cívek napájet sadu snímačů během rotace a sledovat vliv velikosti mezery cívek na přenášený výkon.

Pro měření indukčních cívek bylo navrženo zařízení, které co nejvíce připomíná reálné podmínky na stroji. Toto zařízení se skládá z dutého válce obsahující přijímací cívku a měřicí elektroniku a ze stojanu, ve kterém je uložen pohon válce a polohovací zařízení, kterým se nastavuje vzdálenost vysílací a přijímací cívky (viz Obr. 45). Jako náhrada za sadu snímačů byl navržen rezistor o stejné spotřebě (odporu), který je umístěn uvnitř válce.



Obr. 45 Provizorní měřicí zařízení

6.2.1. Konstrukce měřicího zařízení

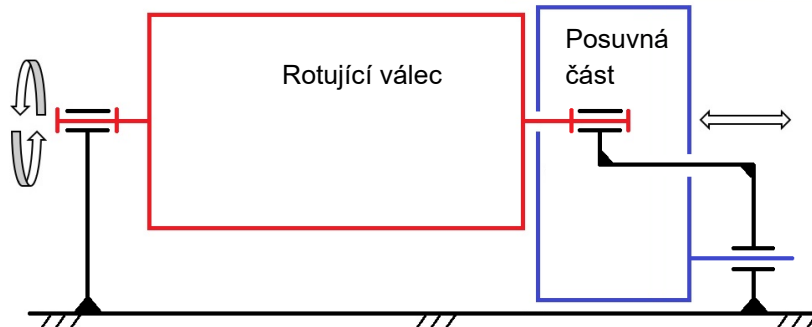
Použité komponenty:

- Stejnoseměrný elektromotor Team Orion Method 17x2
- Stejnoseměrný regulátor Fusion Car Podium FNBR 12T
- RC vysílací souprava Futaba 3PRKA 2,4GHz
- LiPo baterie Duratrax Onyx 7,4V 5000mAh
- Digitální laserový otáčkoměr DT2234C
- Modul pro měření napětí GM Electronic LED bargraf
- Sada 20W keramických rezistorů
- Indukční cívky Taidacent 12V 2A
- Napájecí síťový zdroj 24V, 1A VSZ-24-01
(Cívky jsou určené pro zdroj až 2A, ten ale nebyl k dispozici a byl použit pouze 1A. Na ověření funkce a přenosových charakteristik tato změna nemá vliv)
- Regulovatelný měnič napětí Dexhal 5A STEP-UP DC/DC
- Digitální multimetr Pro'sKit MT-1233C
- Digitální voltmetr GM Electronic 0-99,9V, DC

Popis konstrukce měřicího zařízení

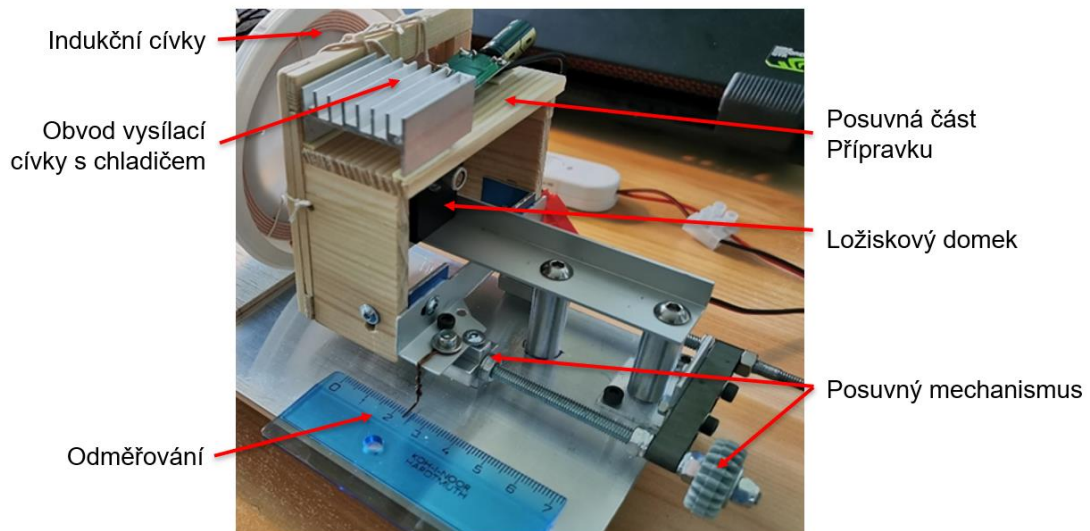
Pohon měřicího zařízení zajišťuje stejnosměrný elektromotor, který je ovládán RC soupravou s nastavitelnými konstantními otáčkami. Výkon se přenáší přes ozubený řemen na dutý válec z tvrdého kartonu, který je uložený v ložiskových domcích. Na pravé straně je ložiskový domek uložen více do prostoru (viz Obr. 46), aby zde byl prostor pro uložení napájecí cívky a polohovací mechanismus (viz Obr. 47).

Výrobce indukčních cívek udává, aby byl mezi nimi minimální vzduchová mezera 8mm kvůli možnému přehřívání. Zařízení bylo navrženo pro mezeru 10mm. Na konci polohovacího mechanismu se nachází napájecí cívka a její elektronický obvod. Aktuální poloha odsazení je odečítána z přilepeného pravítka. Na pravém čele válce se nachází druhá cívka. Její elektronický obvod, rezistor a LED bargraf jsou umístěny uvnitř válce.



Obr. 46 Mechanické schéma měřícího přípravku

Po dokončení konstrukce a uložení všech prvků do válce bylo provedeno jeho statické vyvážení v jedné rovině. Konkrétně s použitím pomocného vývažku. Tato metoda nedokáže vyvážit momentovou složku nevyváhy. V dané situaci ovšem toto vyvažování bylo jediné dostupné řešení. S tímto vyvážením je zařízení schopno dosáhnout až 1400 ot/min, ovšem stabilní je jen do 1200 ot/min.

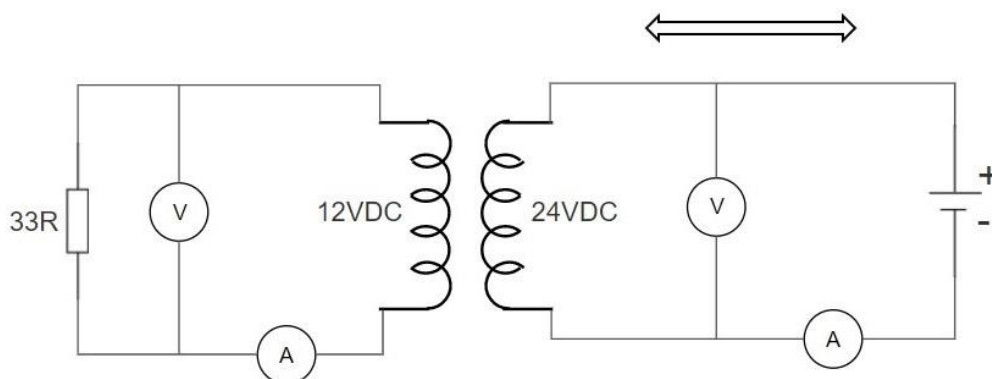


Obr. 47 Polohovací mechanismus

6.2.2. Průběh měření – statický přenos

Nejdříve bylo provedeno statické měření bez rotace, které mělo posloužit jako referenční hodnota pro další měření za rotace. Výsledkem má být kompletní přenosová charakteristika cívek pro různé hodnoty rezistorů při odsazení cívek 10 až 40mm.

Pro toto měření byl použit multimetr, který je řádově přesnější než LED bargraf. Zároveň bylo měřeno jak napětí, tak proud. Pokud by se jednalo o ideální obvod, tak by bylo měření proudu zbytečné, stačilo by pouze měřit napětí a proud dopočítat přes Ohmův zákon. Zde ale figuruje navíc příkon samotného obvodu cívky.



Obr. 48 Schéma zapojení pro statické měření

Celkově byly naměřeny hodnoty pro 4 rezistory, každé měření bylo opakováno 3x a poté byly hodnoty zprůměrovány. Stejně jako v kapitole 6.1.3. byly zvoleny rezistory 33R, 27R a 22R jako adekvátní náhrada snímačů. Jejich příkon by měl být velmi podobný jako příkon snímačů včetně uvažování drobných výkyvů. Rezistor 12R slouží pro ověření maximálních hodnot, které jsou indukční cívky schopné přenášet pro zdroj 1A. Dle výrobce by cívky měly být napájeny napětím 24V a proudem až 2A. Zdroj s výstupním proudem 2A nebyl k dispozici a proto se měření provedlo se zdrojem s výstupním proudem 1A. Cívky jsou tedy maximálně schopné přenést právě proud 1A. Kromě měření hodnot na přijímací cívce, byly také odměřovány hodnoty na vstupu (viz Obr. 48), tedy na vysílací cívce.

Tyto hodnoty ovšem zůstávaly konstantní po celý průběh měření a rovnaly se parametrům stejnosměrného zdroje měřicího zařízení, konkrétně: napětí = 24V, proud = 1A. Velikost napětí přijímací cívky je závislá na účinnosti přenosu mezi cívkami, zatímco její proud na odběru, tedy velikosti odporu rezistoru. V Tab. 20 jsou vypsané teoretické hodnoty pro jednotlivé rezistory.

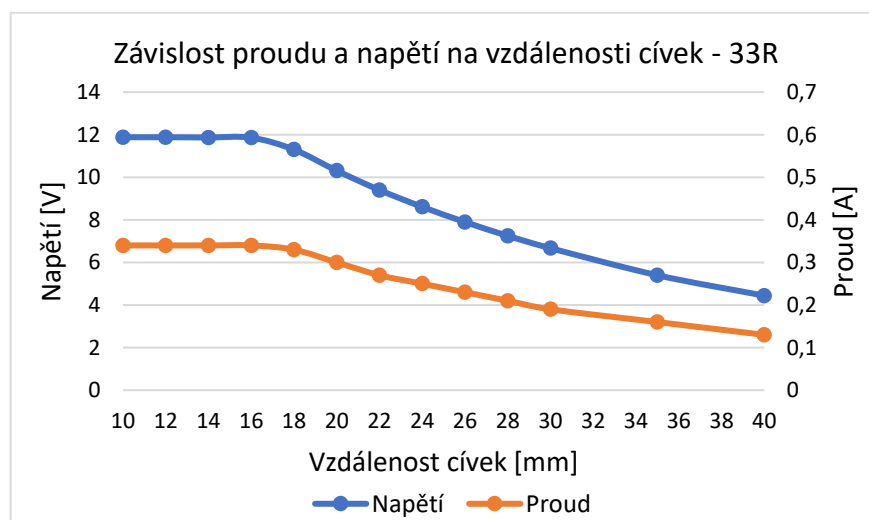
Tab. 20 Vypočtené parametry zvolených rezistorů

Hodnota rezistoru [Ω]	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [W]
33	12	0,364	4,37
27	12	0,444	5,33
22	12	0,545	6,55
12	12	1	12

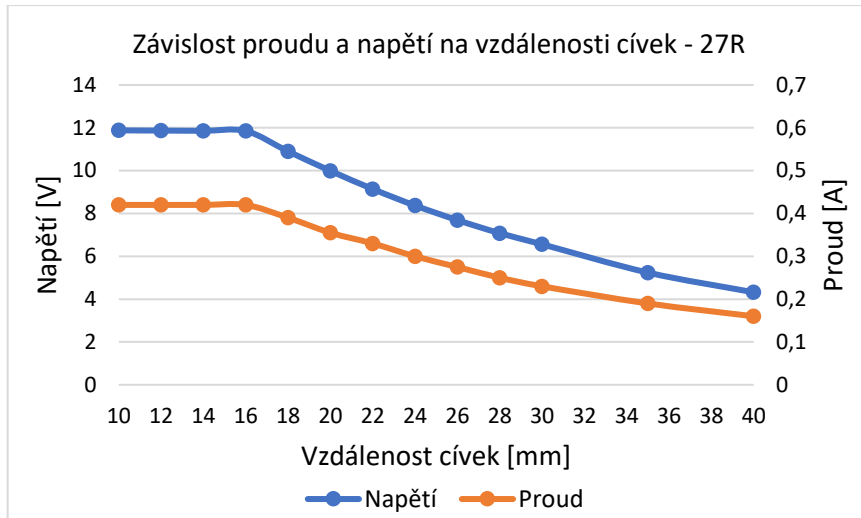
Tab. 21 Naměřené statické hodnoty

Vzdálenost odsazení [mm]	Rezistor 33R			Rezistor 27R			Rezistor 22R			Rezistor 12R		
	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [W]	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [W]	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [W]	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [W]
10	11,88	0,34	4,04	11,88	0,42	4,99	11,87	0,52	6,23	11,8	0,93	10,97
12	11,88	0,34	4,04	11,87	0,42	4,99	11,87	0,52	6,23	11,8	0,93	10,97
14	11,87	0,34	4,04	11,86	0,42	4,98	11,86	0,52	6,23	11,8	0,93	10,97
16	11,86	0,34	4,03	11,85	0,42	4,98	11,62	0,51	6,15	11,69	0,91	10,64
18	11,3	0,33	3,73	10,9	0,39	4,25	10,69	0,47	5,08	10,72	0,84	9,00
20	10,31	0,3	3,09	9,99	0,35	3,55	9,8	0,43	4,21	10,02	0,77	7,72
22	9,4	0,27	2,54	9,14	0,33	3,02	8,96	0,39	3,54	9,09	0,71	6,45
24	8,61	0,25	2,15	8,37	0,3	2,51	8,23	0,36	2,96	8,36	0,65	5,43
26	7,9	0,23	1,82	7,69	0,27	2,11	7,55	0,33	2,49	7,55	0,59	4,45
28	7,25	0,21	1,52	7,08	0,25	1,77	6,91	0,31	2,14	6,95	0,54	3,75
30	6,67	0,19	1,27	6,56	0,23	1,51	6,36	0,28	1,78	6,35	0,49	3,11
35	5,4	0,16	0,86	5,24	0,19	1,00	5,16	0,23	1,19	5,06	0,40	2,02
40	4,44	0,13	0,58	4,32	0,16	0,69	4,23	0,19	0,80	4,13	0,33	1,36

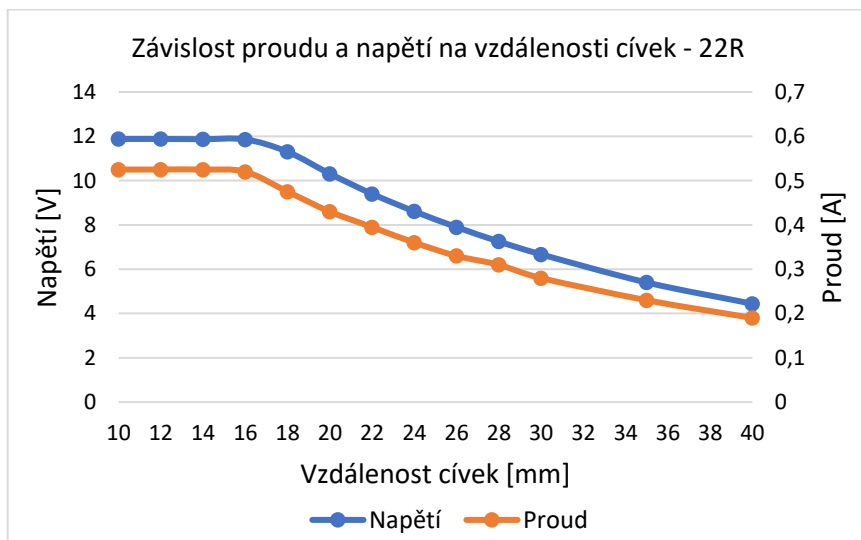
V Tab. 21 jsou naměřené hodnoty z přenosu bez rotace. Naměřené hodnoty rezistorů všech jsou podobné těm teoretickým. Je zde ale vidět účinek ztrát jak v samotném přenosu mezi cívkami, tak vliv spotřeby vlastních obvodů cívek. Na Obr. 49 je vidět závislost proudu a napětí na vzdálenosti, které se s rostoucí vzdáleností snižují. Tento průběh se pak opakuje i pro další hodnoty rezistorů (viz Obr. 50, Obr. 51 a Obr. 52). Na Obr. 53 je pak vidět závislost výkonu na vzdálenosti cívek všech rezistorů.



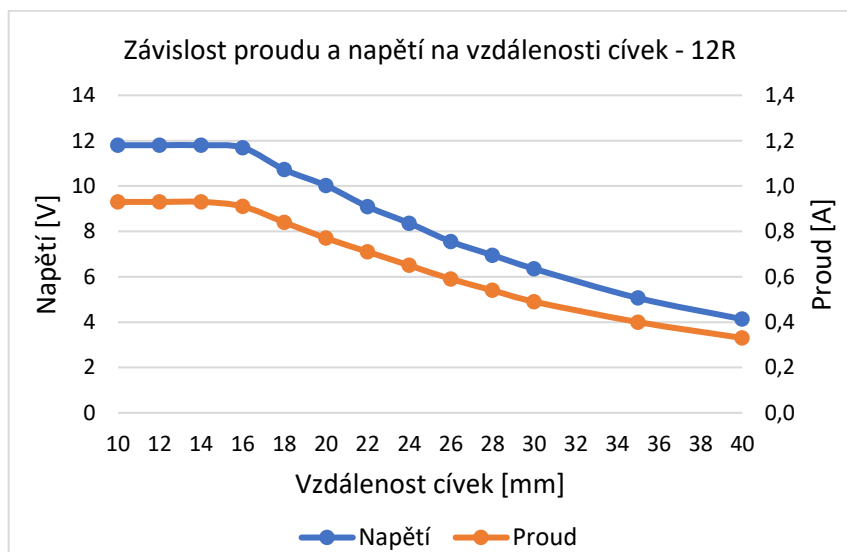
Obr. 49 Průběh statického přenosu pro rezistor 33R



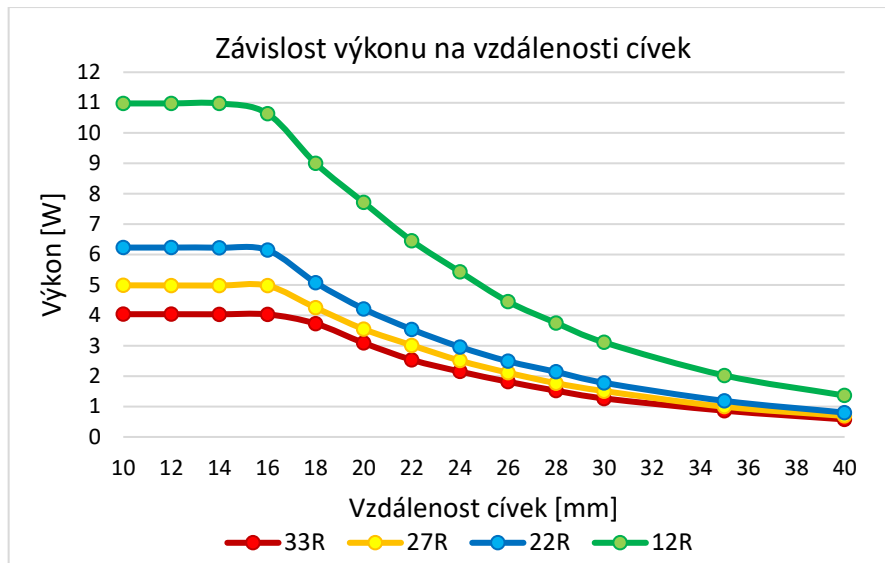
Obr. 50 Průběh statického přenosu pro rezistor 27R



Obr. 51 Průběh statického přenosu pro rezistor 22R



Obr. 52 Průběh statického přenosu pro rezistor 12R



Obr. 53 Zobrazení výkonu přenosu pro jednotlivé rezistory

Vyhodnocení

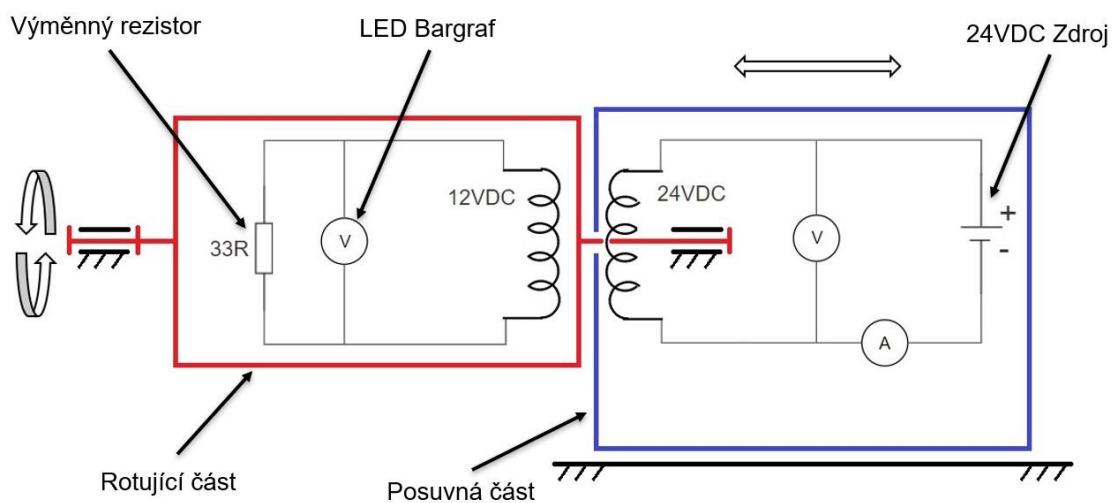
Ze všech grafů vyplývá, že do vzdálenosti 16mm je přenos lineární, téměř beze ztrát. Poté nastává pokles a účinnost výrazně klesá. Zároveň bylo provedeno samostatné měření, kdy byly mezi indukční cívky vkládány železné i neželezné předměty, aby bylo otestováno možné stínění nebo překrytí cívek. Výsledek byl takový, že neželezným materiálem může být překryto až 100% plochy cívek a nemá to vliv na přenesený výkon. Co se týče železných, tedy vodivých a magnetických materiálu, nebyl zde pozorován žádný vliv při překrytí cca do 30% plochy.

6.2.3. Průběh měření – přenos za rotace

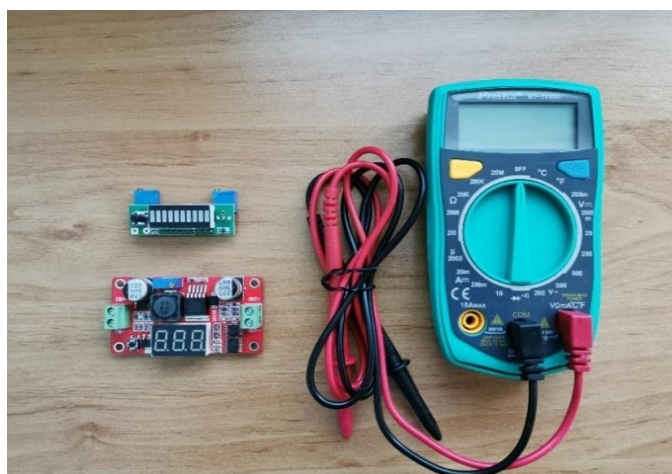
Měřicí zařízení je schopné dosáhnout až 1400 ot/min. Při otáčkách nad 1200 ot/min však začne výrazně vibrovat a je nestabilní. Proto bylo měření realizováno při 1000 ot/min.

Pro měření napětí na rezistoru byla zvolena optická metoda odečítání z LED bargrafu. Ten musel být nejdříve zkalibrován na správný rozsah. Bargraf má celkem 10 diod a nastavitelné rozmezí napětí. Pro první sérii měření byla nastavena horní mez na 11,8V a dolní mez na 9,8V. Jeden dílek/dioda tedy odpovídá 0,2V. Pro pokračování měření byla potřeba bargraf vyjmout a nastavit rozsah na nižší rozlišení, a to na horní mez 9V a dolní mez 4V. Jeden dílek tedy odpovídá 0,5V. Je to z toho důvodu, že přenos v takto nízkých hodnotách není potřeba důkladně mapovat, protože jeho hodnoty jsou pro stabilní funkci snímačů příliš nízké. Proto má měření takto nízkých hodnot spíše informativní charakter. Nastavení bargrafu proběhlo pomocí regulovatelného měniče napětí a zpětnou kontrolou přesnosti pomocí multimetru. Tato zařízení jsou vidět na Obr. 55.

Za rotace bude měřeno pouze napětí a hodnoty proudu budou dopočítány přes Ohmův zákon. Schéma zapojení zařízení je vidět na Obr. 54.

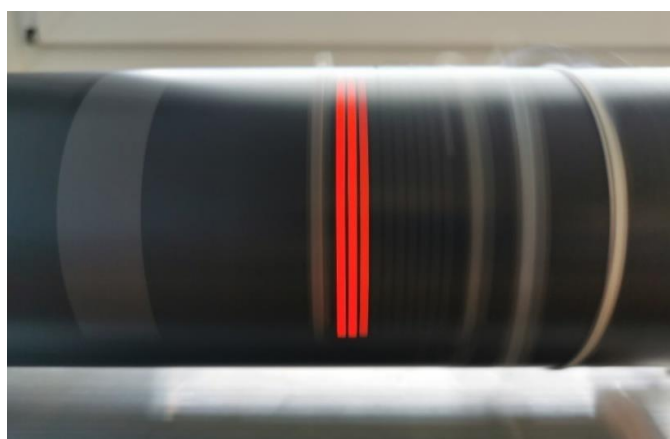


Obr. 54 Schéma zapojení měřícího zařízení



Obr. 55 Zleva diodový bargraf, pod ním měnič napětí a napravo digitální multimetr

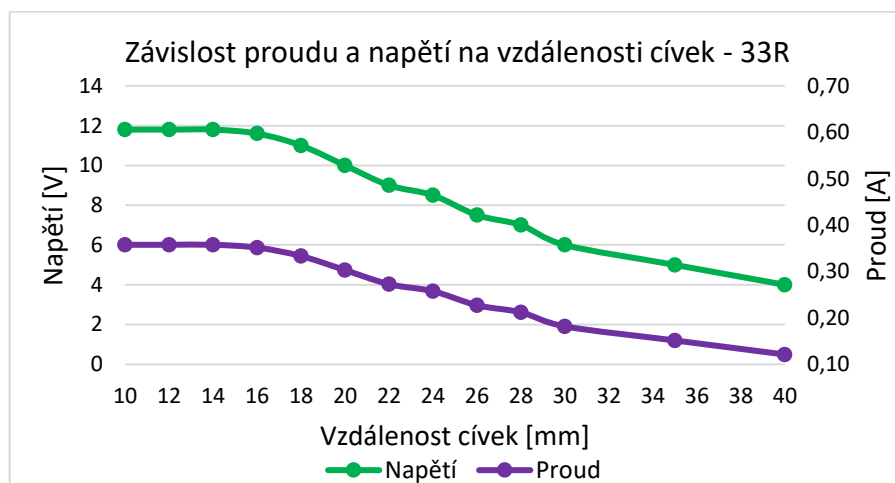
Protože byl bargraf uložen rovnoběžně podél osy rotace, bylo jeho odečítání za chodu měřícího zařízení dobře čitelné (viz Obr. 56).



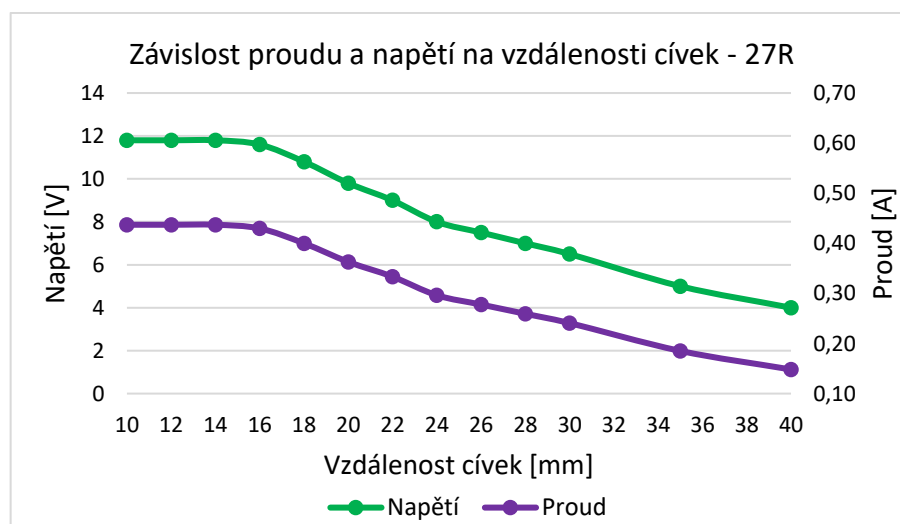
Obr. 56 Čitelnost diodového bargrafu za rotace

Tab. 22 Naměřené hodnoty za rotace

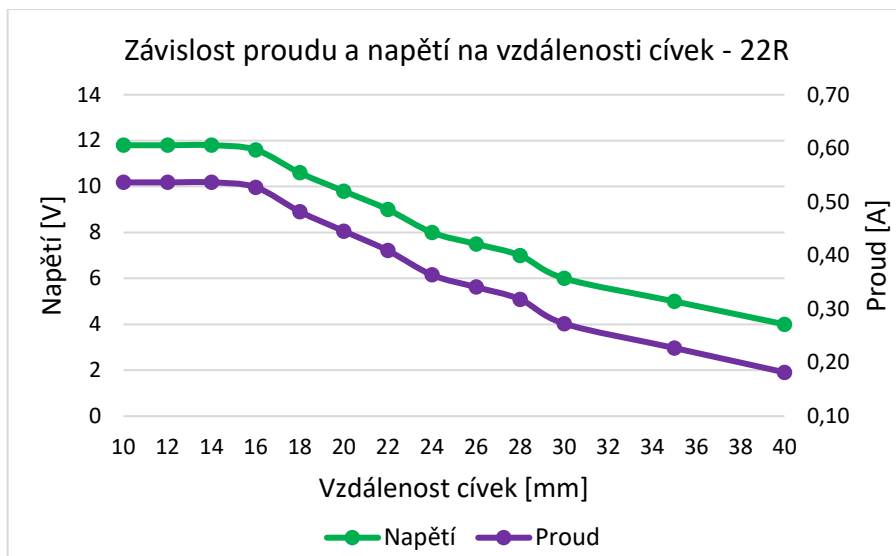
Vzdálenost odsazení [mm]	Rezistor 33R			Rezistor 27R			Rezistor 22R			Rezistor 12R		
	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [W]	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [W]	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [W]	Napětí [V]	Proud [A]	Výkon [W]
10	11,8	0,36	4,22	11,8	0,44	5,16	11,8	0,54	6,33	11,8	0,98	11,60
12	11,8	0,36	4,22	11,8	0,44	5,16	11,8	0,54	6,33	11,8	0,98	11,60
14	11,8	0,36	4,22	11,8	0,44	5,16	11,8	0,54	6,33	11,8	0,98	11,60
16	11,6	0,35	4,08	11,6	0,43	4,98	11,6	0,53	6,12	11,6	0,97	11,21
18	11	0,33	3,67	10,8	0,40	4,32	10,6	0,48	5,11	10,6	0,88	9,36
20	10	0,30	3,03	9,8	0,36	3,56	9,8	0,45	4,37	10	0,83	8,33
22	9	0,27	2,45	9	0,33	3,00	9	0,41	3,68	9	0,75	6,75
24	8,5	0,26	2,19	8	0,30	2,37	8	0,36	2,91	8	0,67	5,33
26	7,5	0,23	1,70	7,5	0,28	2,08	7,5	0,34	2,56	7,5	0,63	4,69
28	7	0,21	1,48	7	0,26	1,81	7	0,32	2,23	7	0,58	4,08
30	6,5	0,18	1,09	6,5	0,24	1,56	6	0,27	1,64	6	0,50	3,00
35	5	0,15	0,76	5	0,19	0,93	5	0,23	1,14	5	0,42	2,08
40	4	0,12	0,48	4	0,15	0,59	4	0,18	0,73	4	0,33	1,33



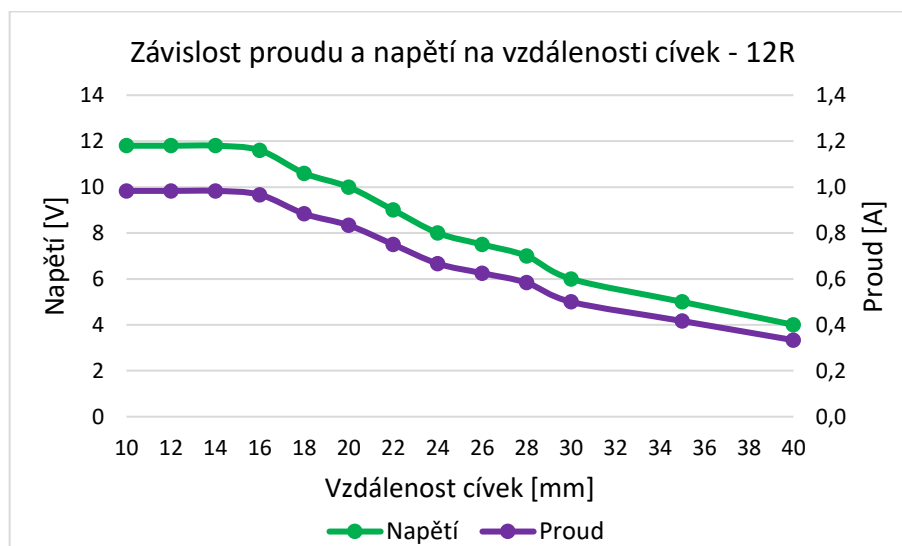
Obr. 57 Průběh přenosu za rotace pro rezistor 33R



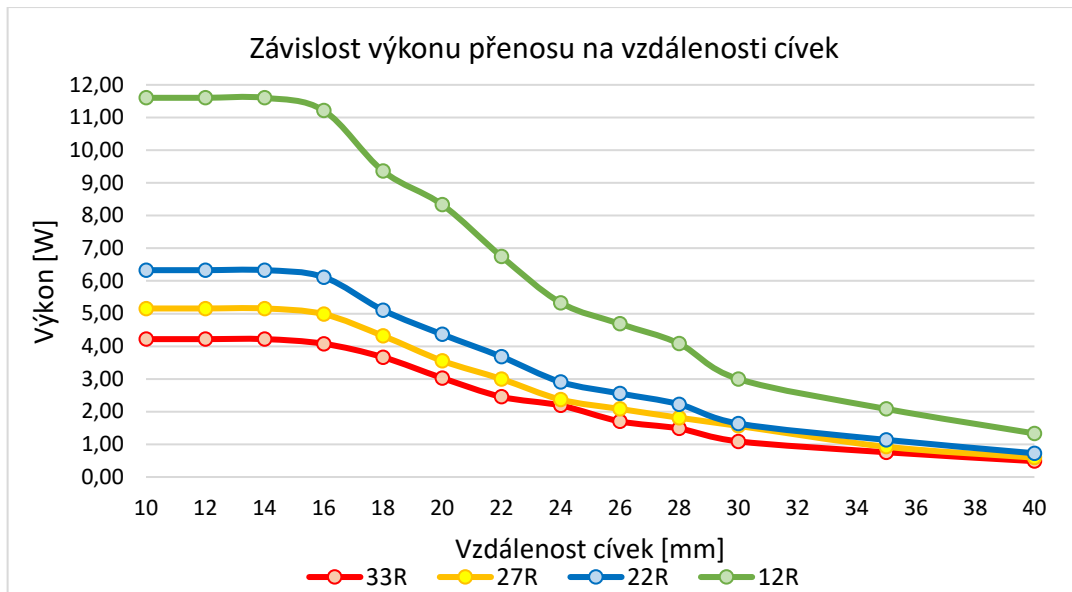
Obr. 58 Průběh přenosu za rotace pro rezistor 27R



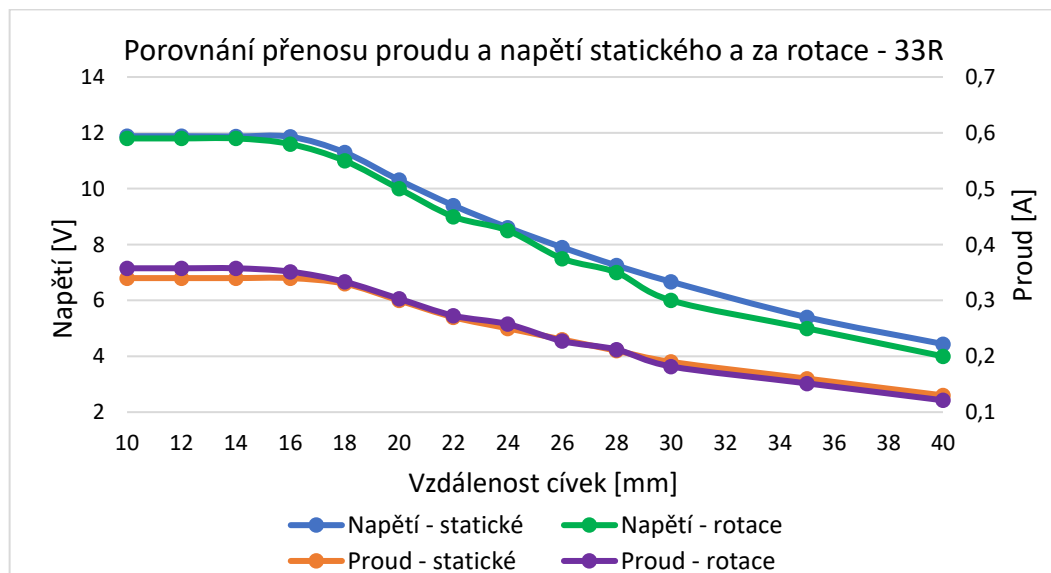
Obr. 59 Průběh přenosu za rotace pro rezistor 22R



Obr. 60 Průběh přenosu za rotace pro rezistor 12R



Obr. 61 Zobrazení přenosu výkonu pro jednotlivé rezistory



Obr. 62 Vliv rotace na přenos napětí a proudu pro rezistor 33R

6.2.4. Vyhodnocení měření

V Tab. 22 a na následujících grafech (Obr. 57, Obr. 58, Obr. 59, Obr. 60 a Obr. 61) jsou vidět naměřené hodnoty přenosu energie za rotace. Z naměřených hodnot a grafů je vidět, že hodnoty statického přenosu a přenosu za rotace se téměř neliší. Na Obr. 62 je vidět porovnání statického přenosu a přenosu za rotace pro rezistor 33R. Pro ostatní rezistory mají grafy velmi podobný průběh, proto nejsou v samotné práci zobrazeny.

Drobné odchylky hodnot mezi statickým přenosem a přenosem za rotace jsou způsobeny mimo jiné spíše horším rozlišením LED bargrafu než vlivem rotace na přenos.

Důležitým faktorem je to, že se při rotaci měřilo pouze napětí pomocí bargrafu a ne proud, ten se dopočítal z Ohmova zákona dle odporu rezistoru. Tímto způsobem se zanedbal příkon samotného obvodu přijímací cívky, příkon bargrafu a uvažuje se ideální hodnota rezistorů, která ovšem ideální není a jejich odchylka se dle výrobce pohybuje do 5%. Proto je možné na grafech upozorovat, že přenos za rotace vykazuje trochu vyšší hodnoty proudu než ten statický. Je třeba také zahrnout fakt, že provizorní měřicí zařízení bylo konstruováno za nepříznivých podmínek a většina dílů byla vyrobena ručně. Proto potřebná souosost a rovnoběžnost indukčních cívek měly pravděpodobně větší odchylku, než jak by tomu bylo při výrobě dílů na obráběcích strojích nebo 3D tiskárně.

Bylo provedeno několik měření pro simulaci vyššího příkonu snímačů ve vřetení (s využitím rezistorů 33R, 27R a 22R) a jedno měření k ověření maximálního přenosu indukčních cívek (s rezistorem 12R). U všech měření je oblast stabilního napájení stejná. Jedná se o odsazení cívek ve vzdálenosti 10mm až 14mm, za vhodných podmínek až 16mm. V této oblasti nedochází ke ztrátě účinnosti bezdrátového přenosu a je tedy ideální pro napájení snímačů na vřetení.

7. Závěr

Předmětem této diplomové práce bylo zjistit možnosti napájení snímačů na rotačních částech stroje.

Byla provedena rešerše možností napájení elektrických struktur na rotačních částech stroje konkrétně rekuperací energie, bezdrátovým přenosem energie, sběrnými kroužky a využitím generátoru. Z každé možnosti napájení byly představeny nejvhodnější metody pro použití na rotujících strojních částech. Na konci rešerše bylo provedeno shrnutí probraných metod a vytipovány 3 vhodné způsoby napájení, které nejlépe splňují požadavky zadání. Jsou to: sběrné kroužky, generátor a indukční cívky. Pro každou z metod bylo nalezeno vhodné komerční zařízení a vytvořena varianta koncepčního návrhu integrace systému na vřeteno.

Pro reálné nasazení byla jako nejvýhodnější varianta zvolena ta s indukčními cívkami. Bylo vybráno zařízení Taidacent 12V 2A Wireless Power Supply Module od firmy Shenzhen Taida Century.

Byl navržen test vybraného zařízení pro ověření funkce a schopnosti napájet snímače během rotace. Z důvodu virové pandemie byl však navržen a realizován alternativní test na provizorním testovacím zařízení.

Bylo ověřeno, že indukční cívky jsou vhodné pro napájení snímačů na rotačních částech stroje dle požadavků zadání a vliv rotace na přenos energie je zanedbatelný.

Seznamy

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma vibračního piezoelektrického generátoru [5].....	15
Obr. 2 Generování elektrického proudu magnetickou indukcí [2].....	15
Obr. 3 Schéma elektrostatického generátoru s elektretovým tělesem [8].....	16
Obr. 4 Piezoelektrické MEMS vibrační generátory řady BOLT [9].....	17
Obr. 5 Závislost výkonu na frekvenci generátoru BOLT-M0100X [9]	18
Obr. 6 Elektromagnetický HiPER-D Kinergizer generátor a jeho frekvenční charakteristika [10]	18
Obr. 7 ReVibe generátory [11].....	19
Obr. 8 PMG Perpetuum generátor [12].....	19
Obr. 9 Princip indukčního přenosu pomocí dvou cívek [15]	20
Obr. 10 Rozdíl mezi indukční cívkou bez stínění vlevo a se stíněním vpravo [16]	22
Obr. 11 Magnetické pole pro dvojici stíněných cívek [16]	22
Obr. 12 Blokové schéma přenosu přes mikrovlny [18].....	23
Obr. 13 Princip rezonančního přenosu [14]	24
Obr. 14 Porovnání účinnosti u rezonančního a indukčního přenosu se zvyšující se vzdáleností cívek [20].....	25
Obr. 15 Porovnání účinnosti u rezonančního a indukčního přenosu se zvyšujícím se přesazením cívek [20]	25
Obr. 16 Zleva Tx vysílací jednotka WTM905525-12F2-12V-G a napravo Rx přijímací jednotka WRM483265-10F5-12V-G [22]	26
Obr. 17 Zleva zařízení BIC0008 a napravo zařízení BIC0076 [23]	26
Obr. 18 Princip bezdrátového napájení a přenosu dat od firmy BALLUFF [23]	27
Obr. 19 50W varianta WPT zařízení od firmy TDK [20]	27
Obr. 20 Řez zařízením WPT 50W, uspořádání cívek [20]	28
Obr. 21 Princip sběrných kroužků [24].....	28
Obr. 22 Sběrný kroužek Model 230 [25]	29
Obr. 23 Sběrný kroužek SenRing G series 12 [26]	30
Obr. 24 Sběrný kroužek MP310 Series [24]	30

Obr. 25 Rozdíl mezi střídavým a stejnosměrným zapojením [27]	31
Obr. 26 Princip 3-fázového alternátoru [28]	32
Obr. 27 Usměrnění střídavého zdroje generátoru.....	32
Obr. 28 Příruba vřetene.....	36
Obr. 29 Zvolený sběrný kroužek s průchozím otvorem od firmy Moflon [24].....	37
Obr. 30 Návrh uložení generátoru na čelo příruby.....	37
Obr. 31 Rotor A70R-3 [29].....	39
Obr. 32 Stator A70S-3 [29].....	38
Obr. 33 Charakteristika proudu a napětí v závislosti na otáčkách alternátoru [29]	38
Obr. 34 Regulátor R54 pro alternátor SZ10 [29]	39
Obr. 35 Návrh uložení indukčních cívek na čele příruby	40
Obr. 36 Vysílací a přijímací modul Taidacent 12V 2A Wireless Power Supply Module [30].....	41
Obr. 37 Velikost přeneseného proudu v závislosti na vzdálenosti udávaná výrobcem [30].....	41
Obr. 38 Schématické zobrazení elektrického zapojení	43
Obr. 39 Vlevo uložení vysílací cívky a vpravo ukládací trn pro přijímací cívku.....	44
Obr. 40 Schéma uložení dílčích prvků testu	44
Obr. 41 Napájecí LiPo baterie 11,1V [32].....	46
Obr. 42 Měnič napětí Dexhal [33].....	45
Obr. 43 3A Step-Down DC/DC měnič napětí [34]	46
Obr. 44 Superkondenzátor KR-5R5V155-R [37].....	47
Obr. 45 Provizorní měřicí zařízení	48
Obr. 46 Mechanické schéma měřicího přípravku.....	49
Obr. 47 Polohovací mechanismus.....	49
Obr. 48 Schéma zapojení pro statické měření.....	50
Obr. 49 Průběh statického přenosu pro rezistor 33R	51
Obr. 50 Průběh statického přenosu pro rezistor 27R	52
Obr. 51 Průběh statického přenosu pro rezistor 22R	52
Obr. 52 Průběh statického přenosu pro rezistor 12R	52

Obr. 53 Zobrazení výkonu přenosu pro jednotlivé rezistory	53
Obr. 54 Schéma zapojení měřicího zařízení.....	54
Obr. 55 Zleva diodový bargraf, pod ním měnič napětí a napravo digitální multimetr	54
Obr. 56 Čitelnost diodového bargrafu za rotace	54
Obr. 57 Průběh přenosu za rotace pro rezistor 33R	55
Obr. 58 Průběh přenosu za rotace pro rezistor 27R	55
Obr. 59 Průběh přenosu za rotace pro rezistor 22R	56
Obr. 60 Průběh přenosu za rotace pro rezistor 12R	56
Obr. 61 Zobrazení přenosu výkonu pro jednotlivé rezistory	57
Obr. 62 Vliv rotace na přenos napětí a proudu pro rezistor 33R	57

Seznam tabulek

Tab. 1 Porovnání parametrů dosahovaných jednotlivými generátory [1, 2].....	17
Tab. 2 Parametry zařízení řady BOLT s výstupem 2,5÷3,6V [9].....	17
Tab. 3 Parametry zařízení generátoru KINERGIZER [10].....	18
Tab. 4 Parametry zařízení ReVibe s výstupem 2,8÷5V [11].....	19
Tab. 5 Parametry zařízení Perpetuum s výstupem 5V [12].....	19
Tab. 6 Rozdíl mezi elektromagnetickou indukcí a magnetickou rezonancí [21]	24
Tab. 7 Porovnání parametrů dosahovaných jednotlivými přenosy [14, 20, 23]	25
Tab. 8 Parametry přijímacího zařízení TDK [24].....	26
Tab. 9 Parametry zařízení BALLUFF [25].....	27
Tab. 10 Parametry zařízení Mercotac [27].....	29
Tab. 11 Parametry zařízení G series 12 Super High Speed [28]	30
Tab. 12 Parametry zařízení MP310 Series [26].....	30
Tab. 13 Srovnání možností napájení rotačních částí stroje	34
Tab. 14 Parametry zvoleného sběrného kroužku [26].....	37
Tab. 15 Parametry alternátoru SZ10 [31]	39
Tab. 16 Rozměry modulu Taidacent 12V 2A [32]	40
Tab. 17 Parametry modulu Taidacent 12V 2A [32]	40
Tab. 18 Porovnání parametrů snímačů a rezistorů.....	43

Tab. 19 Hodnoty příkonů pro jednotlivé rezistory.....	45
Tab. 20 Vypočtené parametry zvolených rezistorů	50
Tab. 21 Naměřené statické hodnoty.....	51
Tab. 22 Naměřené hodnoty za rotace	55

Seznam rovnic

Výkon (1)	44
Ohmův zákon (2)	44
Výpočet výkonu z energie (3)	48
Výpočet doby napájení (4)	48

Seznam použité literatury

- [1] BEEBY, S. P., M. J. TUDOR a N. M. WHITE. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology* [online]. 2006, **17**(12). ISSN 13616501. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/17/12/R01
- [2] COTTONE, Francesco. Introduction to Vibration Energy Harvesting. In: *Introduction to Vibration Energy Harvesting* [online]. 2011, s. 1–21. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-20355-3_1
- [3] BAUDRY, H. *Screen Printing Piezoelectric Devices* [online]. 1987. ISSN 13565362. Dostupné z: doi:10.1108/eb044294
- [4] WHITE, N. M. a J. D. TURNER. *Thick-film sensors: Past, present and future* [online]. 1997. ISSN 09570233. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/8/1/002
- [5] MORII, Hiroki, Kenichi KURIBAYASHI a Toshiyuki KONISHI. Development of Steel Bridge Clattering-detecting Device Utilizing Vibration-powered Generator. In: *Procedia CIRP* [online]. B.m.: Elsevier B.V., 2017, s. 57–60. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2016.09.037
- [6] TANG, Xiudong a Lei ZUO. Vibration energy harvesting from random force and motion excitations. *Smart Materials and Structures* [online]. 2012, **21**(7). ISSN 09641726. Dostupné z: doi:10.1088/0964-1726/21/7/075025
- [7] CADEI, Andrea, Alessandro DIONISI, Emilio SARDINI a Mauro SERPELLONI. Kinetic and thermal energy harvesters for implantable medical devices and biomedical autonomous sensors. *Measurement Science and Technology* [online]. 2014, **25**(1). ISSN 13616501. Dostupné z: doi:10.1088/0957-0233/25/1/012003
- [8] MASAKI, Tatsuakira, Kenji SAKURAI, Toru YOKOYAMA, Masayo IKUTA, Hiroshi SAMESHIMA, Masashi DOI, Tomonori SEKI a Masatoshi OBA. Power output enhancement of a vibration-driven electret generator for wireless sensor applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [online]. 2011, **21**(10). ISSN 09601317. Dostupné z: doi:10.1088/0960-1317/21/10/104004

- [9] *Products Overview Micro-Power Product Line for Industrial & Building Wireless Sensor Applications* [online]. 2013 [vid. 2019-11-02]. Dostupné z: www.microgensystems.com
- [10] KINERGIZER. *Ambient Motion Energy harvesting* [online]. [vid. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://kinergizer.com/#home-products-header>
- [11] REVIBE ENERGY. *Product overview - vibration energy harvesting solutions* [online]. 2020 [vid. 2020-07-02]. Dostupné z: <https://revibeenergy.com/product-overview-harvesting/>
- [12] APO, Daniel J. a Shashank PRIYA. Levitation-induced vibration energy harvesters. *MOVIC 2014 - 12th International Conference on Motion and Vibration Control*. 2014, 1–6.
- [13] WATELECTRICAL. *Wireless Power Transmission Technology Working with Applications* [online]. 2019 [vid. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.watelectrical.com/wireless-power-transmission-technology/>
- [14] CHANDRASEKAR RAO, T. S. a K. GEETHA. Categories, standards and recent trends in wireless power transfer: A survey. *Indian Journal of Science and Technology* [online]. 2016, **9**(20). ISSN 09745645. Dostupné z: [doi:10.17485/ijst/2016/v9i20/91041](https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i20/91041)
- [15] ROY, Roland Van. Introduction to RT1650 Wireless Power Receiver [online]. 2015, (September), 1–15 [vid. 2019-11-15]. Dostupné z: https://www.richtek.com/Design_Support/Technical_Document/AN036
- [16] RAPHAEL, Specht. Wireless Power Transfer. *Power Electronics Handbook* [online]. 2019, 711–722. Dostupné z: [doi:10.1109/TIE.2016.2596238](https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2596238)
- [17] WINMATE. *Electronic Potting* [online]. 2020 [vid. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://www.winmate.com/electronic-potting.asp>
- [18] SASAKI, Susumu, Koji TANAKA a Ken Ichiro MAKI. Microwave power transmission technologies for solar power satellites. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2013, **101**(6), 1438–1447. ISSN 00189219. Dostupné z: [doi:10.1109/JPROC.2013.2246851](https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2246851)
- [19] PEDIAA. *Difference Between Inductive Effect and Resonance Effect | Definition, Mechanism, Comparison* [online]. 2017 [vid. 2020-02-07]. Dostupné z: <https://pediaa.com/difference-between-inductive-effect-and-resonance-effect/>
- [20] TDK. Achieves Wireless Power Transfer to Mobile Objects with High Efficiency Can Also Be Used for Rotating Parts Such as a Robot Arm [online]. 2019, 1–16 [vid. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://product.tdk.com/info/de/techlibrary/developing/wireless/index.html>
- [21] MATSUMOTO, Hiroshi. Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan. *IEEE Microwave Magazine* [online]. 2002, **3**(4), 36–45. ISSN 15273342. Dostupné z: [doi:10.1109/MMW.2002.1145674](https://doi.org/10.1109/MMW.2002.1145674)
- [22] TDK. *Wireless Power Transfer Rx Coil Modules* [online]. 2019 [vid. 2019-11-19]. Dostupné z: <https://product.tdk.com/info/en/environment/icon.html>
- [23] BALLUFF. *BIC Inductive Couplers Non-contact power and data transmission in automation* [online]. 2019 [vid. 2019-12-28]. Dostupné z: www.balluff.com

- [24] MOFLON. *Slip rings - MOFLON INC* [online]. [vid. 2019-11-19]. Dostupné z: https://www.moflon.com/what_is_slip_ring.html
- [25] MERCOTAC. *Mercotac Brushless Slip Rings* [online]. 2019 [vid. 2019-11-19]. Dostupné z: <http://www.mercotac.com/>
- [26] SENRING. *SNG012-12 series High Speed slip ring [High Speed slip ring] Hollow Shaft High Speed slip ring-SenRing Electronics* [online]. [vid. 2019-11-19]. Dostupné z: <https://www.senring.com/high-speed-slip-ring/g012-12.html>
- [27] BYJU. *Difference Between AC and DC Generator In Tabular Form* [online]. 2020 [vid. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://byjus.com/physics/difference-between-ac-and-dc-generator/>
- [28] ALTERNATIVE ENERGY TUTORIALS. *Synchronous Generator used for Wind Power Generation* [online]. 2020 [vid. 2020-02-18]. Dostupné z: <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/synchronous-generator.html>
- [29] VAPE. *Systémy zapalování a alternátory* [online]. 2020 [vid. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://eshop.vape.cz/>
- [30] SHENZHEN TAIDA CENTURY. *Shenzhen Taida Century Technology Co,Ltd wireless modules* [online]. 2020 [vid. 2020-03-01]. Dostupné z: <http://taida-century.com/en/product.asp?ClassID=001002>
- [31] K&V ELEKTRO. *Zalévací hmota GPH ZH-PUR 250* [online]. 2020 [vid. 2020-07-11]. Dostupné z: <https://www.e1.cz/produkt/1178619-zalevací-hmota-gph-zh-pur-250-dvousložková-220ml?t=popis>
- [32] ASTRAMODEL. *Black Magic LiPol 11.1V 3200mAh 25C Deans (BMF25-3200-3D) | Astra* [online]. [vid. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.astramodel.cz/cz/katalog/black-magic/black-magic-lipol-11-1v-3200mah-25c-deans-p65897.html>
- [33] DEXHAL. *Měniče napětí - Dexhal.cz* [online]. [vid. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.dexhal.cz/5a-step-up-zvysuje-dc-dc-menic-napeti-konvertor_z495/
- [34] DEXHAL. *Měniče napětí - Dexhal.cz* [online]. [vid. 2020-07-13]. Dostupné z: https://www.dexhal.cz/3a-step-down-dc-dc-menic-napeti-konvertor_z189/
- [35] DIOPAN VÁCLAV. *Superkondenzátory: nahradí v budoucnu lithium-iontové baterie? | Hybrid.cz* [online]. 20. března 2018 [vid. 2020-07-06]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/superkondenzatory-nahradi-v-budoucnu-lithium-iontove-baterie>
- [36] SOURAV, Gupta. *Supercapacitor vs Battery - Comparison and Case Study* [online]. 2019 [vid. 2020-07-06]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/tutorial/supercapacitor-vs-battery-comparison-and-case-study>
- [37] TME. *KR-5R5V155-R EATON ELECTRIC Superkondenzátor - Elektronické součástky* [online]. [vid. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/kr-5r5v155-r/superkondenzatory/eaton-electric/>

Seznam Příloh

Textové přílohy

- | | |
|-------------|---|
| Příloha č.1 | Výrobní výkres příruby vřetene |
| Příloha č.2 | Schéma vlastních obvodů indukčních cívek Taidacent
12V 2A Wireless Power Supply Module |

Elektronické přílohy

- Diplomová práce (.pdf)
- Nástavec vysílací cívky (.step)
- Nástavec přijímací cívky (.step)

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení

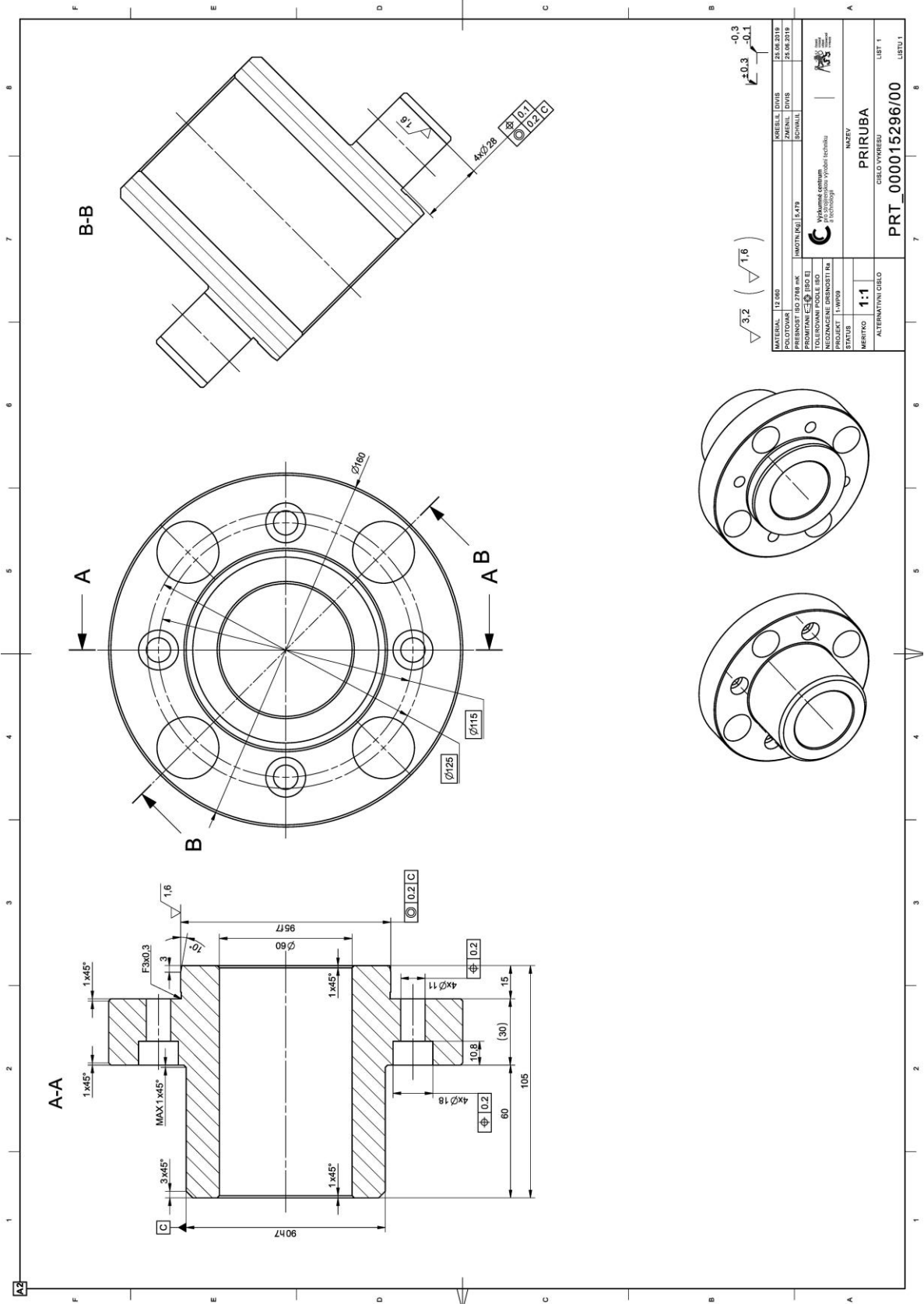


Diplomová práce

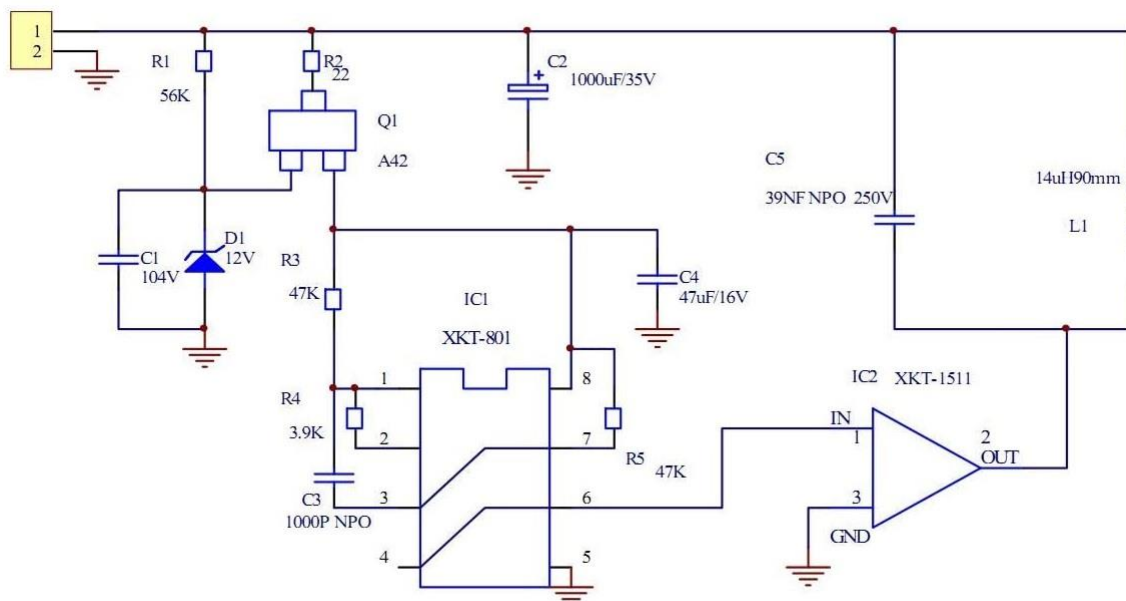
Napájení snímačů na rotujících strojních částech

Textové přílohy

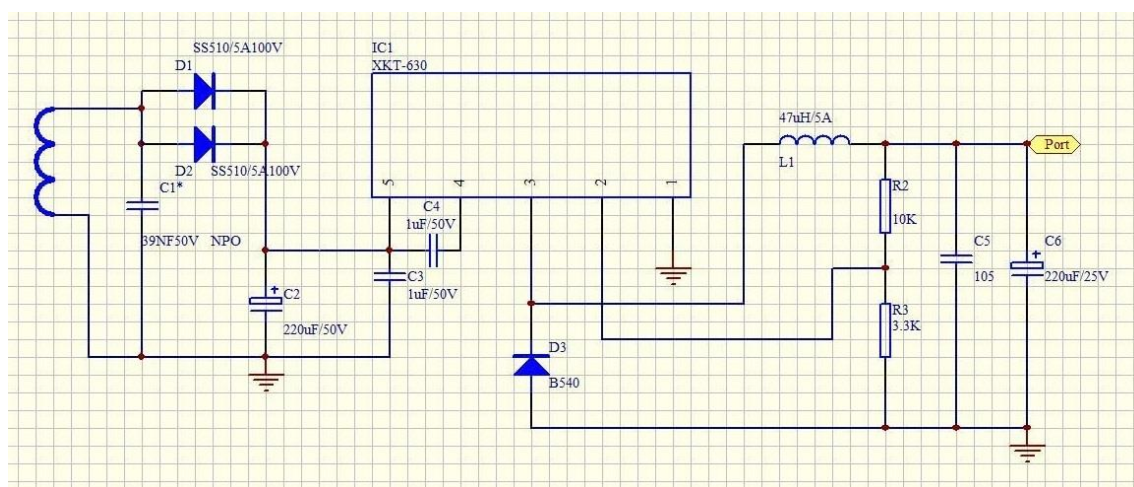
Příloha č.1 – Výrobní výkres příruby vřetene



Příloha č.1 – Schéma vlastních obvodů indukčních cívek Taidacent
12V 2A Wireless Power Supply Module



Obr.1 Schéma elektrického zapojení vysílací cívky



Obr. 2 Schéma elektrického zapojení přijímací cívky