



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

GENERÁTOROVÉ SNÍMAČE

POWER HARVESTING SENSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

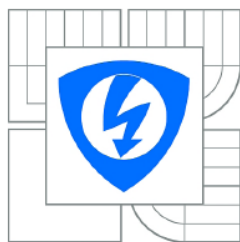
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

KAMIL PŘIKRYL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Kamil Přikryl
Ročník: 3

ID: 72279
Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Generátorové snímače

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proved'te literární průzkum v oblasti generátorových snímačů a jejich využití ve funkci zdroje napájecí energie pro navazující elektroniku.

Navrhněte a realizujte napěťový měnič se vstupním napětím pod 1V. Podrobně proměřte jeho vlastnosti, především pak závislost na impedanci zdroje energie.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle vlastního literárního průzkumu a doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

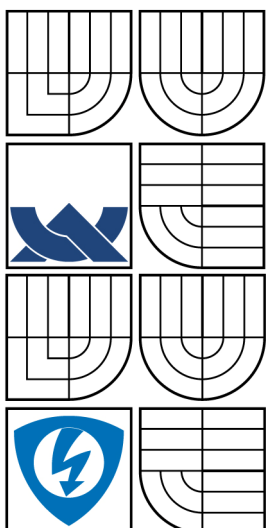
Termín odevzdání: 31.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘÍCÍ TECHNIKY

GENERÁTOROVÉ SNÍMAČE

Bakalářská práce

Autor: Kamil Příkyl

Vedoucí: Doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Anotace

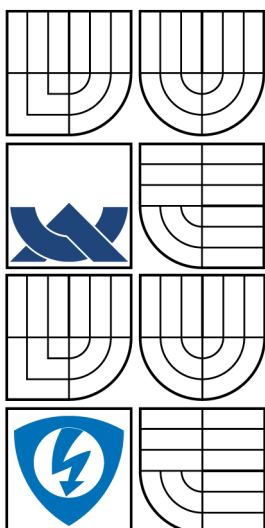
Cílem této bakalářské práce je základní seznámení s problematikou generátorových snímačů a jejich využití ve funkci zdroje pro navazující elektroniku. Dále pak návrh a realizace napěťového měniče se vstupním napětím 0,3 V.

Nejprve je vysvětlen pojem power harvesting. Následně jsou uvedeny různé způsoby zisku energie z okolního prostředí a praktické ukázky jejich využití pomocí generátorových snímačů. V druhé části práce je návrh a popis funkce napěťového měniče s integrovaným obvodem Seiko S-882Z. Poslední část je zaměřena na proměření vlastností napěťového měniče, především pak závislosti na vnitřní impedanci zdroje.

Klíčová slova

bezdrátové senzory, energy harvesting, energy scavenging, mikroenergetické generátory, samonapájecí systémy, senzory bez baterií

Brno 2010



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FACULTY OF ELECTRICAL
ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND
INSTRUMENTATION

POWER HARVESTING SENSORS

Bachelor's thesis

Author: Kamil Přikryl
Supervisor: Doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Annotation

The aim of this bachelor's thesis is basic apprise of power harvesting senzors problematic and their application in power supply function for advancing electronics. Futhermore then design and realization of the DC/DC converter with operating input voltage 0,3 V.

At first is expounded name power harvesting . After that are introduced several methods of gain energy from the ambient area and practical demonstrations their exploitation by means of power harvesting senzors. In the second part is the design and description of the DC/DC converter with the integrated circuit Seiko S-882Z. The last part is sight on measurement properties of the DC/DC converter, foremost then dependence of internal impedance of the power supply.

Keywords

wireless senzors, energy harvesting, energy scavenging, microgenerators, self-powered systems, senzors without batteries

Brno 2010

Bibliografická citace

PŘÍKRYL, K. *Generátorové snímače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 49 s.
Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma "Generátorové snímače" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne :

Podpis:.....

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

V Brně dne :

Podpis:.....

LICENČNÍ SMLOUVA

OBSAH

1. ÚVOD.....	8
2. POWER HARVESTING.....	9
2.1 ZÍSKÁNÍ ENERGIE.....	9
2.1.1 Okolní záření.....	10
2.1.2 Okolní světlo.....	11
2.1.3 Termoelektrická přeměna.....	13
2.1.4 Kinetická energie	18
2.2 TABULKA MOŽNÝCH ZISKŮ ENERGIE Z RŮZNÝCH OKOLNÍCH ZDROJŮ	30
3. DC/DC MĚNIČ SE VSTUPNÍM NAPĚTÍM 0,3 V.....	31
3.1 NÁVRH A KONSTRUKCE DC/DC MĚNIČE.....	31
3.1.1 Integrovaný obvod Seiko S-882Z20.....	33
3.1.2 Integrovaný obvod Seiko S-8353D30MC.....	35
3.2 POPIS FUNKCE DC/DC MĚNIČE.....	36
3.3 POPIS A VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA DC/DC MĚNIČI.....	37
3.3.1 Měření závislosti výkonu a účinnosti DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích a vnitřním odporu zdroje při spojitě činnosti napěťového měniče	37
3.3.2 Měření závislosti výkonu DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích a vnitřním odporu zdroje při nespojitě činnosti napěťového měniče	39
3.3.3 Odezvy výstupního napětí DC/DC měniče na připojení a odpojení zatěžovacího odporu	41
4. NÁVRH SYSTÉMU ENERGY HARVESTING OD TI.....	43
5. ZÁVĚR.....	46
POUŽITÉ ZDROJE	47
SEZNAM PŘÍLOH.....	49

1. ÚVOD

V současné době je na trhu nepřeberné množství různých bezdrátových snímačů, které však ke svému chodu potřebují bateriové napájení. A právě tuto závislost na bateriích se snaží vyřešit generátorové snímače, kterými se tato bakalářská práce zabývá.

Bakalářská práce se dělí na dvě hlavní části. První se zabývá pojmem power harvesting a problematikou s ním spjatou. Jako je získávání a uchování energie z okolního prostředí. Je zde stručně popsáno několik různých metod čerpání energie ze zdrojů jako jsou okolní záření, světlo, teplo a kinetická energie. U každého z uvedených zdrojů jsou pak uvedeny praktické ukázky založené na generátorových snímačích, které plní nebo mohou plnit funkci samostatného zdroje pro navazující elektroniku. První část je zakončena tabulkou, která ukazuje jakých je možno dosáhnout výkonů při využití různých okolních zdrojů.

Druhá část práce je pojata prakticky. Jejím hlavním záměrem je popsat realizaci a funkci napěťového měniče se vstupním napětím 0,3 V v němž je použito integrovaných obvodů Seiko S-882Z a Seiko S-8353. Nachází se zde rovněž popis a dosažené výsledky prováděných měření na DC/DC měniči, zejména závislosti na vnitřní impedanci zdroje napětí. K této části se pak váže i příloha s tabulkami a grafy, které podrobně popisují chování napěťového měniče. Závěrem práce je uveden návrh systému od firmy Texas Instruments přibližující způsob využití energie pro malá elektronická zařízení, získané z okolního prostředí.

2. POWER HARVESTING

Termíny power harvesting, energy harvesting nebo také energy scavenging je nazýván proces, kterým je zachycena a uchována energie. Často jsou tyto termíny použity pro samostatná zařízení, která se používají v senzorových sítích. Získávat energii můžeme z mnoha různých zdrojů jako například solární energie, tepelná energie, větrná energie a kinetická energie.

Tradičně získáváme elektrickou energii z fosilních paliv ve velkých centralizovaných elektrárnách. Ve velkém měřítku je okolní energie jako slunce, vítr a vlny široce dostupná, ale složitější na zpracování. V městských oblastech však existuje překvapivé množství elektromagnetické energie působící na prostředí vlivem rozhlasového a televizního vysílání.

2.1 ZÍSKÁNÍ ENERGIE

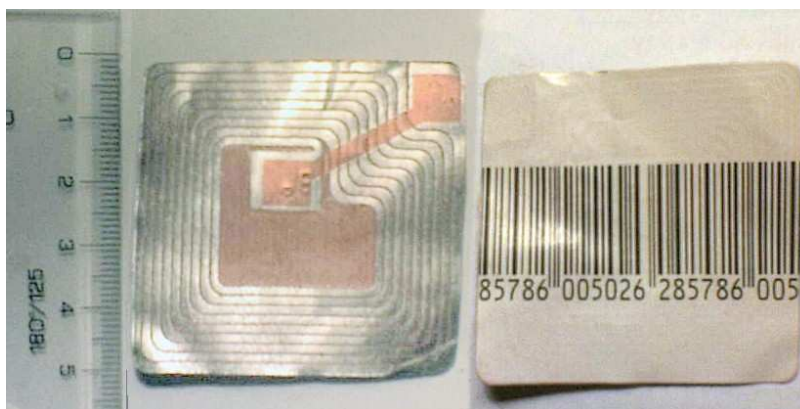
Energy harvesting zařízení převádějící okolní energii na elektrickou energii vyvolaly velký zájem jak v oblasti vojenské tak i obchodní. Některé systémy přeměňují náhodný pohyb, jako oceánské vlny na elektřinu, zde se používají oceánografické sledovací senzory pro autonomní provoz. Budoucí aplikace mohou obsahovat vysoce výkonné přístroje (nebo pole těchto zařízení) rozmístěných na vzdálených místech, aby sloužili jako spolehlivá elektrárna pro velké systémy. Všechna tato zařízení musí být dostatečně robustní, aby vydržela dlouhodobé vystavení nepříznivým podmínkám a mít široký dynamický rozsah citlivosti k využití celého spektra pohybu vlny[20].

Energie může být také sklízena malými autonomními senzory, které jsou vytvořeny pomocí MEMS (Micro-Electro Mechanical System) technologie. Tyto systémy jsou často velmi malé a potřebují velmi nízké napětí, ale jejich činnost je omezena spoléháním se na baterie. Právě získávání energie z okolních vibrací, tepla nebo světla by mohla umožnit inteligentním sensorům neomezeně dlouhou funkčnost. A právě touto variantou se začíná zabývat mnoho vědeckých skupin po celém světě.

2.1.1 Okolní záření

Tento zdroj energie pochází z radiových vysílačů, které jsou v městské zástavbě všudypřítomné. Elektrické systémy, které se snaží tuto energii zpracovat však mají velice omezený výkon a potřebují být umístěny v místech s vysokou koncentrací záření nebo v blízkosti samotného zdroje záření. Výkonový zisk z radiového záření lze velice přibližně odvodit ze vztahu E^2/Z_0 , kde Z_0 je odpor záření ve volném prostoru (377Ω) a E je intenzita elektrického pole v daném místě ve V/m. Elektrické pole o intenzitě 1 V/m pak má zisk pouze $0,26 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ a to jsou pole s tak velkou intenzitou spíše vzácností[20].

Jedním z nápadů jak záření využít je záměrné vysílání vysokofrekvenční energie pro napájení vzdáleného zařízení. Na tomto principu dnes fungují pasivní RFID (Radio Frequency Identification). Princip pasivního RFID čipu je následující. Vysílač (snímač) periodicky vysílá pulsy do okolí a pokud se v blízkosti objeví pasivní RFID čip, využije přijímaný signál k nabití svého napájecího kondenzátoru a odešle odpověď. Využití nalézají jako nástupce čárového kódu. Většinou (dáno jejich konstrukcí) dokáží vysílat jen jedno číslo, určené při jejich výrobě. Čipy jsou k dispozici v provedení pro čtení nebo pro čtení a zápis. Čipy využívají převážně nosnou frekvenci 125 kHz, 134 kHz a 13,56 MHz. Některých státech lze používat i další frekvence jako 868 MHz (v Evropě) a 915 MHz (v Americe). Na obr.2.1 je vidět jak v praxi vypadá nálepka pro zboží s čárovým kódem na jedné straně a pasivním RFID čipem na straně druhé[16].



Obr. 2.1: Nálepka pro zboží s pasivním RFID čipem[16].

S dalším nápadem jak využít elektromagnetického záření produkovaného TV vysílači, anténami mobilních sítí a Wi-Fi přišli inženýři z výzkumných laboratoří společnosti Nokia v Británii. Pracují na prototypu generátorového snímače, který by mohl získat z okolního záření až 50 mW a touto energií pomalu dobíjet mobilní telefon ve vypnutém stavu. Současné prototypy dokáží sklidit tři až pět miliwattů a vyžadují širokopásmový přijímač, jenž dokáže zachytit signály mezi 500 MHz a 10 GHz. Což je rozsah dat zahrnující mnoho různých signálů rádiové komunikace[19].

Ostatní výzkumníci vyvinuli obdobná zařízení se skromnějšími zisky z vybraných frekvencí. Například týmu od Intelu se podařilo zkonstruovat kompaktní snímač schopný čerpat šest mikrowattů z jedné megawattové antény vzdálené 4,1 km daleko[19].

2.1.2 Okolní světlo

Sluneční záření představuje v nějaké formě drtivou většinu energie, která se na Zemi nachází a využívá. Vzniká jadernými přeměnami v nitru Slunce. Vzhledem k tomu, že vyčerpání zásob vodíku na Slunci je očekáváno až v řádu miliard let, je tento zdroj energie označován jako obnovitelný. Slunečními paprsky dopadne na povrch Země přibližně 1 kW/m². Toto číslo se nazývá solární konstanta. Tuto energii lze využít přímo pro výrobu elektrické energie za pomoci fotovoltaického článku (solárního článku).

Fotovoltaické články mohou být vyrobeny různými technologiemi výroby.

Technologie tlustých vrstev - Fotovoltaický článek je tvořen velkoplošnou polovodičovou p-n diodou. Tyto články se vyrábějí z křemíkových plátek, ať už z monokrystalického nebo polykrystalického křemíku. V současné době se touto technologií vyrábí více než 85% solárních článků na trhu[13].

Technologie tenkých vrstev - Fotovoltaický článek je tvořen nosnou plochou (například sklem, textilií a podobně), na které jsou napařené velmi tenké vrstvy amorfního nebo mikrokrytalického křemíku. Množství materiálu, použitého pro výrobu tenkovrstvého fotovoltaického článku, je nižší, než u tlustých vrstev, takže články jsou lacinější. Nevýhodou současných tenkovrstvých fotovoltaických článků je nižší účinnost a nižší životnost.

Nekřemíkové technologie - Na rozdíl od předešlých dvou se pro konverzi světla na elektrickou energii nepoužívá tradiční P-N polovodičkový přechod. Používají se různé organické sloučeniny, polymery a podobně. Tyto technologie jsou většinou ve stadiu výzkumů.

Vzhledem k možnému masovému využití fotovoltaických článků, jejichž výrobní cena by byla podstatně nižší než v současnosti, probíhá také výzkum fotovoltaických článků pracujících s jinými fotocitlivými materiály než je křemík. Jednou z možností jsou vodivé polymery; např. v listopadu 2005 se podařilo výzkumné skupině na University of California v Los Angeles dosáhnout zatím maximální účinnosti 4,4%[13].

Využití solárních článků je různorodé. Od solárních kalkulaček až po energetické zabezpečení horských chat. Velmi zajímavým způsobem používá solární článek firma CITIZEN, vyrábějící náramkové hodinky. Jejich jedinečný systém pohonu s názvem Eco-Drive, využívá vysoce citlivý solární článek, který je pod speciálním průsvitným ciferníkem viz. obr.2.2. Využívá sluneční nebo umělé osvětlení z jakéhokoli zdroje. Proud světla prochází sklem a číselníkem hodinek a solární článek pod nimi přemění světelné záření na elektrickou energii. Elektrická energie se ukládá do miniaturního akumulátoru a podle potřeby potom pohání quartzový stroj hodinek. Použití titan-lithiového akumulátoru umožňuje dle výrobce nashromáždit energii k pohonu na šest až šedesát měsíců bez dalšího dobíjení[2].



Obr. 2.2: Hodinky CITIZEN s pohonem Eco-Drive[2].

Elektrický výkon je dán celkovou plochou a účinností solárních článků. Při ploše 1 dm² a plném slunečním svitu může dávat článek výkon 1,25 W a to při napětí 0,5 V a proudu 2,5 A. Vyšší napětí se získá sériovým řazením a větší proud paralelním řazením. Ve fotovoltaickém článku tak lze na elektřinu přeměnit teoreticky maximálně padesát procent dopadajícího světla. Prakticky se dosahuje účinnosti asi mezi patnácti až dvaceti procenty u průmyslově vyráběných článků. U experimentálních laboratorně vyráběných článků se dosahuje účinnosti až třicet procent. V roce 2006 Národní laboratoř pro obnovitelnou energii USA představila články využívající trojnásobné přechody s efektivitou až 40,7 % [13].

2.1.3 Termoelektrická přeměna

Objekty v prostředí s rozdílnými teplotami nabízí příležitost pro získání energie cestou tepelných přeměn. Z Carnotova cyklu zahrnujícího adiabatické a izotermální činnosti plynou podstatná omezení k zisku energie z teplotních rozdílů. Carnotova účinnost vyplývá ze vztahu $(T_H - T_D)/T_H \equiv \Delta T/T_H$, kde T_D a T_H jsou dolní a horní teploty ve stupních Kelvina napříč kterými tepelný generátor funguje. Proto je Carnotova účinnost omezena pro malé ΔT . Například mezi teplotou lidského těla (37 °C) a chladnou místností (20 °C) je Carnotova účinnost jen 5,5 % [2]. Mechanické produkty tak musí být zkonstruovány tak, aby dokázaly využít i takto malé energie. Příkladem mohou být hodiny ATMOS (obr. 2.3), které pohání plyn, jenž se vlivem změny teploty rozpíná nebo smršťuje. Stačí jen malá změna teploty, jako jeden stupeň celsia, aby dala hodinám rezervu chodu okolo dvou dnů [14].



Obr. 2.3: Hodiny ATMOS poháněné plynem [14].

Výzkum nových termoelektrických a termických materiálů a vývoj nových druhů zařízení jako jsou termální diody a mikronové mezery ve fotovoltaice usilují o zlepšení výkonu zařízení. Přeměnu energie nicméně omezují dostupná pole termických článků, která dosahují účinností někde pod deseti procenty pro teploty mezi 200 °C až 20 °C, ale méně než jedno procento pro rozmezí teplot mezi 40 °C až 20 °C [2]. Proto mohou dát termoelektrické generátory významné výkony jen z vysoce teplotních zdrojů jako (horké výfukové potrubí), ale jsou mnohem více limitované pro běžné aplikace.

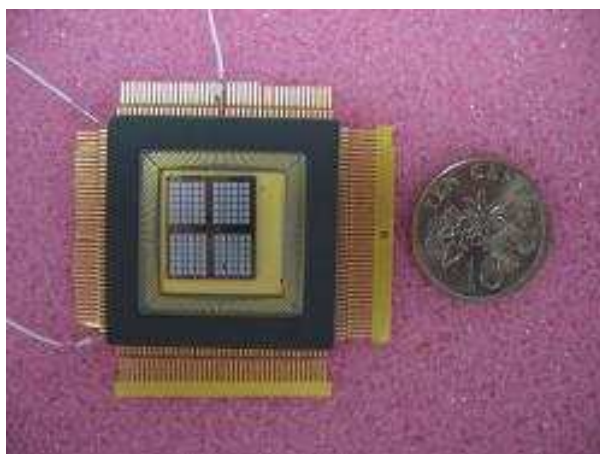
Příkladem použití termoelektrických generátorů může být automobilová firma BMW. Jak je známo, provoz automobilu vyžaduje elektrickou energii, jež se na palubě vozu získává řetězcem procesů, při nichž dochází ke značným ztrátám. Chemickou energii obsaženou v palivu je třeba nejprve v motoru přeměnit na energii mechanickou, a teprve poté pomocí generátoru získat energii elektrickou. Snahou je tedy dopracovat se k elektrické energii procesem s větší účinností. Již delší dobu je známo, že u BMW pro to využívají také systém s palivovými články APU (Auxiliary Power Unit) jako zdroj elektrické energie pro dobíjení akumulátoru, ale druhou zkoumanou možností je právě využití odpadního tepla motoru. V tomto případě jde o známou technologii, používanou již po čtyři desetiletí pro získání elektrické energie k provozu kosmických sond. Termoelektrický proces tvorby elektrické energie využívá vlastností termoelektrických polovodičových prvků, u nichž elektrické napětí vytváří teplotní spád. Ještě před pár lety měly tyto TEG (termoelektrické generátory) účinnost jen několik procent, takže pro automobily vhodné nebyly. Výkon těchto modulů ovšem díky velkému pokroku ve vývoji vhodných materiálů pokročil natolik, že se situace podstatně změnila, a vývojové oddělení BMW nyní již řeší jak se s integrací systémů TEG do automobilu vypořádat. Zatímco v kosmických sondách slouží za zdroj tepla například rozpadající se radioaktivní prvky, v automobilu se nabízí právě odpadní teplo motoru. Termoelektrický generátor se tedy nastěhoval do výfukového systému (obr. 2.4), přičemž jeho průtočné průřezy musely být samozřejmě přizpůsobeny tak, aby nedošlo k ovlivnění charakteristik spalovacího motoru[10].



Obr. 2.4: Termoelektrické generátory zabudované do výfukového systému automobilu[10].

Nabízí se ovšem námitka, že odvedené teplo by mohlo chybět při některých fázích provozu katalyzátorů, resp. čističů pevných částic. I na to však u BMW mají svůj recept, jenž spočívá v inovaci termoelektrického generátoru tak, že by se při obrácení základního pracovního procesu, to znamená napájení polovodičů elektrickým proudem, katalyzátor pro účinné snížení škodlivých emisí zahřívá. Jakmile by spaliny dosáhly potřebné teploty, proces by se znovu vrátil k výrobě elektrické energie. Aktuálně disponuje systém TEG elektrickým výkonem 200 W, rychlý vývoj nových materiálů by jej měl zvýšit na 1000 W. V budoucnu lze počítat s poklesem spotřeby v běžném provozu kolem 5 % [10]. Termoelektrický generátor je také ideálním doplněním již praktikovaného procesu rekuperace, kdy při brzdění nebo během jízdy setrvačností se akumulátor dobíjí elektrickou energií, získanou z pohybové energie automobilu.

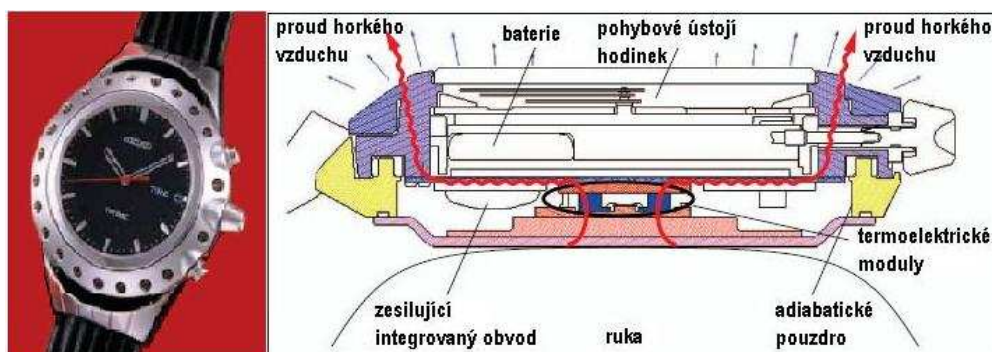
Kromě poměrně velkých termoelektrických generátorů se však už objevují i první zmínky o podobných zařízeních s miniaturními rozměry. Článek o minigenerátoru vhodném pro osobní použití publikovali Jin Xie a Hanhua Feng z Institute of Microelectronics, což je Singapurská vládní agentura pro vědu, spolu s Chengkuo Lee z National University of Singapore v jednom z čísel vědeckého časopisu Journal of Microelectromechanical Systems. Celé zařízení tvoří jediný čip o velikosti $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Je na něm více než 30 000 termoelektrických článků. Jsou organizovány do skupin - termofil. Ty využívají rozdíly teplot přičemž při teplotním spádu 5 stupňů Celsia generují napětí 16,7 V a výkon $1,3 \mu\text{W}$. Již nyní ale vědci prohlašují, že tyto parametry vylepší, aby jednotka dávala několik mikrowatů [12].



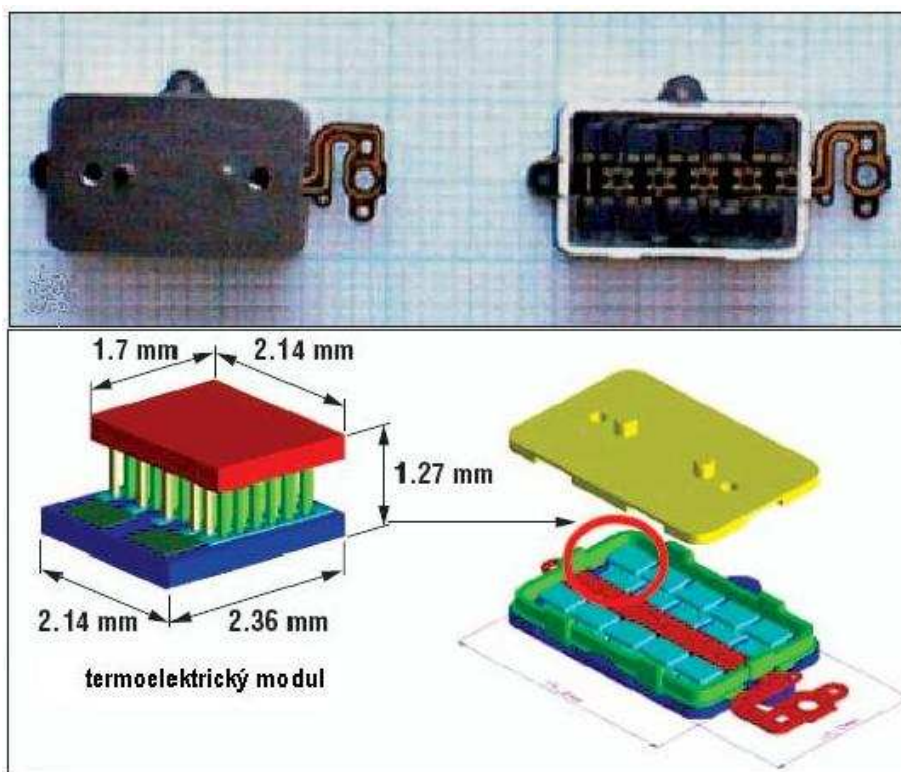
Obr.2.5: Singapurský minigenerátor v keramickém pouzdře vedle deseticentu[12].

I když Asijci nejsou první, kteří publikovali generování proudu z lidského těla, jejich produkt je lepší ať už jde o miniaturizaci, či výkonové parametry. Novinkou je vkládání "vakuových děr". Jde o oddělení spodní vrstvy, která se dotýká pokožky, od té vrchní, která je ochlazována vzduchem. Vylepšení parametrů přechodové vrstvy vkládáním "ničeho" zamezuje přechodu tepla a větší teplotní spád zvyšuje výkon generátoru. Další zlepšení dosáhli vložení této „vakuové vrstvy“ po celém jeho obvodu. Tím se zase snížil převod tepla z obvodového pláště. Jednou z nejzásadnějších výhod je kompatibilita s technologií CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor), kterou se dnes vyrábí většina čipů, elektronických pamětí typu SRAM a obrazových senzorů.

Jako jedna z prvních firem využívající komerčně termoelektrické přeměny v malém zařízení je firma Seiko, která uvedla na trh termické náramkové hodinky (obr. 2.6). Používají deset termoelektrických modulů (obr. 2.7) ke generování dostatečného množství energie k chodu mechanického strojku hodinek z malého teplotního nárůstu mezi teplotou těla a okolní teplotou[2].



Obr. 2.6: Termické hodinky značky Seiko – uspořádání[2].

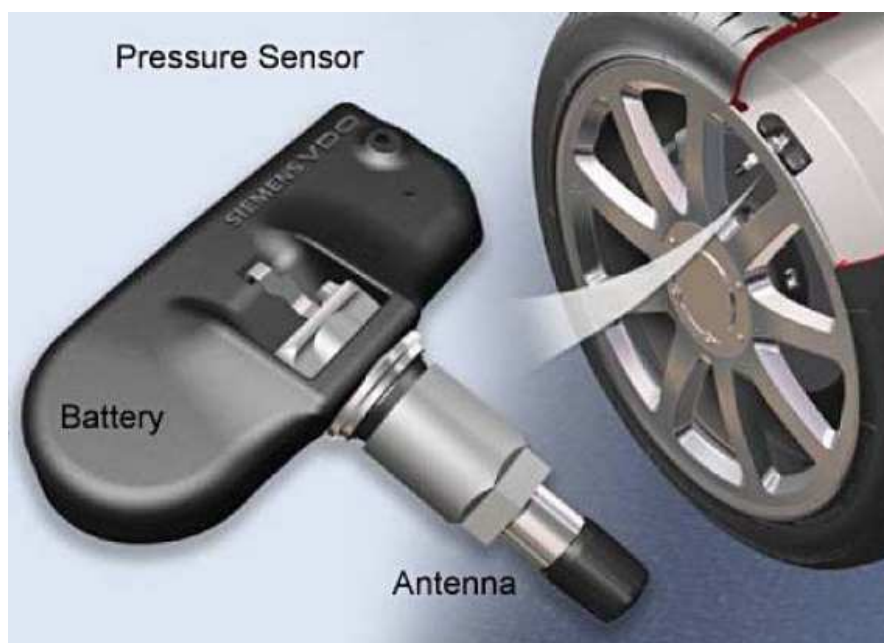


Obr. 2.7: Termoelektrický modul použitý v hodinkách Seiko Thermic[2].

2.1.4 Kinetická energie

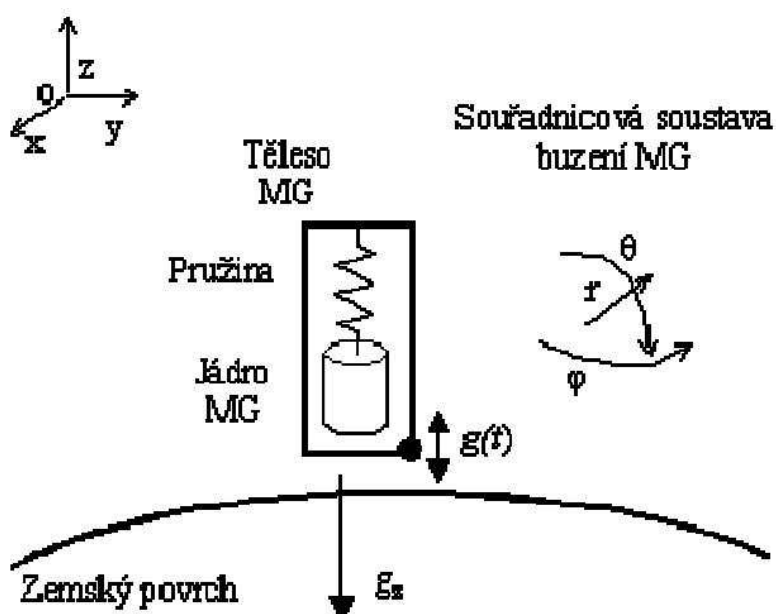
Vibrace - v mnoha případech je zajímavé právě využití pohybové energie z přirozeného mechanického chvění a pohybu v našem okolí. Tyto mechanické podněty jsou obvyklé, ale mohou velmi kolísat jak ve frekvenci, tak v amplitudě.

Návrh koncepce a technického řešení mikrosystému pro generování elektrické energie při použití mechanického chvění (vibrací) se stal náplní evropského výzkumného projektu Vibes (Vibration Energy Scavening), řešeného skupinou odborníků z University of Southampton, Velká Británie, pod vedením Dr. S. Beebyho. Řešitelé představili odborné veřejnosti výsledek své více než tříleté činnosti – miniaturní vibrační generátor pro napájení vestavných elektronických přístrojů, jehož objem je menší než jeden krychlový centimetr a výkon řádu desítek mikrowattů. Generátor využívá seismický pohyb magnetů s přídavnou setrvačnou hmotou upevněných na konci vetknutého nosníku, k němuž dochází při působení vibrací na tělo přístroje. Pohybující se magnety generují ve snímací cívce elektrický proud. Protože je z generátoru požadován napěťový výstup, je snímací cívka navinuta z velmi jemného drátu o průměru jen 12 μm . Díky tomu může mít cívka s vnějším průměrem 2,8 mm a tloušťkou 0,5 mm asi 2 800 závitů, což v kombinaci s optimalizovaným magnetickým obvodem umožňuje získat z vibrací o frekvenci 50 Hz a zrychlení asi $0,6 \text{ ms}^{-2}$ napětí o efektivní hodnotě větší než 700 mV, což odpovídá výstupnímu výkonu vyššímu než 55 μW [7]. Podle vedoucího řešitelského kolektivu je nový generátor desetkrát účinnější než všechny podobné přístroje známé v současné době a je navržen tak, aby jej bylo možné vyrábět s využitím progresivní mikrosystémové technologie. Odborníci předpokládají, že nový mikrogenerátor bude nejdříve použit pro napájení bezdrátových snímačů, které sledují stav průmyslových výrobních zařízení. Velmi dobře je použit firmou Siemens VDO v bezdrátových senzorech v asistenčních systémech pro sledování tlaku v pneumatikách Tire Pressure Monitoring System – TPMS (obr. 2.8). Dále by jej bylo možno použít k napájení kardiostimulátorů implantovaných v těle pacientů. Uvádí se, že v případě kardiostimulátoru stačí k fungování mikrogenerátoru i jen tlukot srdce pacienta.

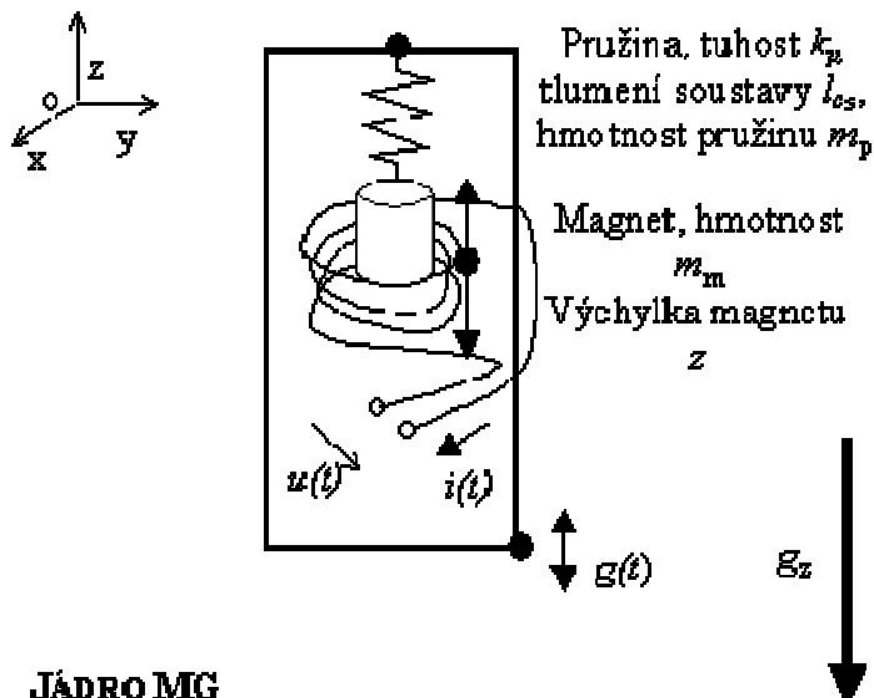


Obr. 2.8: Systém pro sledování tlaku v pneumatikách vyrobený firmou Siemens VDO[7].

Obdobně funguje gravitační mikrogenerátor. Na základě vibrační soustavy je v generátoru uveden do pohybu element, který indukuje ve vinutí napětí. Základem je Faradayův indukční zákon viz. obr. 2.9. Na obr. 2.10 je pak zobrazen princip mikrogenerátoru.



Obr. 2.9: Koncepce mikrogenerátoru[6].



JÁDRO MG

Obr. 2.10: Těleso mikrogenerátoru[6].

Současný výzkum je prováděn v EADS – European Aeronautic Defense and Space Company (Evropská společnost pro letectví, obranu a vesmírný výzkum). Zabývá se výrobou letadel pro civilní i vojenské použití, vesmírných a obraných systémů. Tento mikrogenerátor je určen k napájení senzorů umístěných na nejvíce namáhaná a kritická místa v letadle. Vzhledem k bezpečnosti i možnosti instalovat tento systém i do starších letadel je nutné, aby senzory měly vlastní nezávislé napájení. Každý mikrogenerátor má napájet jeden senzor (teplotní, senzor tlaku...) po celou dobu letu a pak umožnit obsluhu na letištích přehrání dat z celého letu do centrální databáze. Celý systém má varovat před případnými mechanickými poškozeními v jednotlivých částech letadla, umožnit přesněji sledovat stárnutí a únavu materiálu důležitých prvků a celkově zvýšit celkovou kontrolu a bezpečnost dopravních letadel. Mikrogenerátor má výstupní napětí jeden až tři volty a celkový výkon jeden miliwatt[6].

Piezelektrický jev - je dnes široce aplikovaným elektromechanickým jevem v mnoha oborech lidské činnosti. Spektrum aplikací zahrnuje senzory, převodníky mechanických veličin, aktory a ultrazvukové motorky a patrně každý z nás vědomě či nevědomě některou z těchto aplikací používá v každodenním životě. Výzkum a vývoj nových aplikací není ani zdaleka uzavřen – dnešními velice zkoumanými možnostmi je použití piezelektrických prvků ke generaci náboje.

V dielektrických materiálech lze na nosiče náboje působit také mechanickým tlakem. Spolu s deformací krystalové mřížky se posouvají i elektrické náboje v její struktuře. Pokud nemá krystalová mřížka střed symetrie, vzniká nesymetrické uspořádání nábojů charakterizované nenulovým dipólovým momentem. Velikost dipólového momentu je přímo úměrná velikosti působícího tlaku. Tento jev byl podle řeckého slova *piezō* = tlačit nazván přímým piezelektrickým jevem. K přímému jevu existuje také obrácený piezelektrický jev, který spočívá ve vzniku mechanické deformace generované v látce elektrickým polem. Oba jevy existují pouze v krystalických strukturách bez středu symetrie, a to ještě vzhledem ke krystalové mřížce jen v některých určitých směrech. Jevy tedy nenajdeme např. v žádném z kovů, které mají středově symetrické krystalové mřížky z kubické nebo hexagonální soustavy symetrie. Dipólové momenty také existují v látce pouze během zatížení krystalu mechanickým tlakem. Bez stlačení je piezelektrická látka elektricky neutrální. Podobně u obráceného piezelektrického jevu se krystal přiložením elektrického pole mechanicky deformuje a po vypnutí pole se krystal vrací do stavu před deformací[8].

Piezelektrického jevu využili vědci z CEA/Leti-MINATEC, z výzkumu a vývoje institutu v Grenoblu ve Francii, který se specializuje v mikroelektronice. Vyvinuli systém využívající energii z vibrací piezelektrické struktury ovlivněné pádem dešťových kapek. Systém pracuje s kapkami o průměru jeden až pět milimetrů a simulace ukazují, že je možné získat až 12 mW z jedné z větších lijákových kapek. Zařízení by mohlo být alternativou k napájení v oblastech s deštivým venkovním prostředím, kde je obtížné využít sluneční energii. Aby však bylo možné vybudovat systém sběru energie z deště je důležitou součástí odhad využitelné energie při nárazu. Při dopadu dešťová kapka produkuje dokonale

neelastický otřes. Množství energie, které může být při dopadu využito se odhaduje pomocí mechanicko-elektrického modelu (obr. 2.11)[15].



Obr. 2.11: Mechanicko-elektrický model[15].

K zachycení mechanické energie z kapky vědci používají PVDF (Polyvinildenfluorid) polymer, piezoelektrický materiál přeměňující mechanickou energii na elektrickou. Při dopadu dešťové kapky na 25 μm tlusté PVDF začne polymer vibrovat. Elektrody vložené do PVDF slouží k obnovení elektrického náboje generovaného vibracemi. Skupina experimentovala s kapkami různých velikostí, padajícími výškami a rychlostmi. Zjistili, že pomalu padající dešťové kapky vytvářejí nejvíce energie, protože kapky deště padající při vysokých rychlostech často ztrácejí energii v důsledku tvořící se louže. Pomocí mikropump, kterými vytvářeli kapky, výzkumníci prokázali, že při poklesu výšky je elektrická energie úměrná druhé mocnině poklesu mechanické energie, zatímco napětí a mechanická energie jsou přímo úměrné. Největší kapky způsobily největší vibraci na PVDF, a proto generovaly největší množství elektrické energie. Bylo prokázáno, že je systém schopen při nehorším scénáři produkovat jeden mikrowatt trvalého výkonu.

Množství využitelné energie přímo závisí na velikosti piezoelektrické membrány, velikosti kapky a jejich četnosti. Okamžitý výkon začíná od několika mikrowattů až po desítky miliwattů pro plochy několika centimetrů čtverečních[15].

S dalším velice zajímavým nápadem jak využít piezoelektrického jevu přišli fyzikové z University of Utah, kteří vyvinuli malé zařízení, jež umí přeměnit teplo na zvuk a ten následně na elektřinu. Přeměna tepla na zvuk nic nového není. Umí se to už celé desetiletí. Zařízením, která to dokáží, se říká akustické tepelné stroje. Nyní přišli vědci s nápadem, jak z tepla vyrobený randál zužítkovat a přeměnit jej na elektrický proud. Většina zařízení k zužitkování tepla byla dosud velká, nebo málo efektivní. Tento hendikep je předem vyřazoval z použití v počítačích a jim podobných malých přístrojích. Nejmenší tepelné akustické zařízení, které se Američanům nyní podařilo vyrobit, má délku 1,8mm. Pokud se tyto miniaturní stroje spojí do větších celků, jsou schopny produkovat 1 watt elektrické energie z každého centimetru krychlového objemu využitého prostoru[9]. Orest Symko (profesor z University of Utah) je přesvědčen, že tyto prvky bude možno spojovat a ve formě prefabrikovaných buněk z nich sestavovat nový typ solárních panelů. Většina tepelně elektrických zařízení využívajících zvukové vlny, kterou Symko v laboratoři vyrobil, je zabudována do trubkových rezonátorů, jejichž velikost je zhruba taková, že „padnou“ do ruky viz. obr. 2.12.



Obr.2.12: Orest Symko předvádí, jak teplo z plynového hořáku, je-li nasměrováno na přepážku v trubici, přemění se na zvuk[9].

Každá z těchto trubek (rezonátorů) obsahuje oddíl s velkým počtem malých prvků, které jsou zhotoveny tak, aby měly velký povrch. Tvoří je například plátky kovu, nebo vlákna z kovu a nebo ze skla. Dokonce se může jednat jen o vlákna z bavlny. Tato přepážka rozděluje trubku na studeno - horký a horko - teplý výměník. Když se do takto přepažené trubky zavede plamen, nebo se v ní zapojí topné tělísko, vyvolá to na straně výstupu teplého vzduchu akustické vlny. Trubka začne vyluzovat tóny. Stane se z ní tak trochu flétna nebo varhanní píšťala. Dlouhé rezonační trubky vyluzují hluboké tóny, ty nejkratší zase piští. Na jedné straně tedy do trubky vkládáme teplo a na výstupu máme zvuk. A teď právě přichází přeměna vzniklého rambajzu pomocí piezoelektrického jevu na elektřinu. Tento princip má celou řadu předností. Při jejich výrobě se nemusí bazírovat na přesnosti. Symko tvrdí, že zařízení dokonce ani nemusí znepříjemňovat své okolí rušivým hlukem. K zajištění tichosti provozu těchto strojů prý lze volit hned několik cest. Stačí patřičně zkrátit rezonátor a celé zařízení začne pracovat v oblasti ultrazvuku. Ten, jak známo, je pro lidské ucho neslyšitelný. Druhým způsobem, jak omezit nepříjemné akustické „smetí“ spočívá v zatížení celého zařízení. Jakmile z něj začneme odebírat elektrický proud, produkovaný randál významně klesá. A konečně poslední způsob, kterého lze využít, je obalení stroje protihlukovou izolací. Stroj (Obr. 2.13) o délce necelé čtyři centimetry a šířce něco málo přes jeden centimetr, stačí k produkci zvuku teplotní rozdíl mezi studenou a teplou částí výměníku jen 32 stupňů Celsia[9].



Obr.2.13: S takovýmto miniaturním tepelně akustickým strojem Symko počítá, že bude zajišťovat chlazení v počítačích a z odpadního tepla vyrábět elektrický proud[9].

Některé stroje produkují zvuk, jež dosahuje hladiny 135 decibelů. To je více, než vydává pneumatické kladivo. Zvyšováním tlaku v rezonátoru lze ze stejného zařízení dostat více rámusu a tím také více elektřiny. Pokud rezonátor pracuje se zvýšeným tlakem, stačí menší teplotní rozdíl k tomu, aby zařízení začalo pracovat a rozezvučelo se. To je velmi podstatné zjištění, především pro výrobce elektroniky, protože počítače a jim podobné přístroje, většinou produkují jen malé množství odpadního tepla. Podle autora objevu ale i notebooky produkují dost tepla na to, aby se toto zařízení využilo k jejich chlazení a tím i jako zdroj dodatečného proudu. Aby mohlo dojít k efektivní přeměně zvuku na elektřinu, musí být jednotlivá zařízení párována. To proto, aby produkované zvukové vlny byly o stejné frekvenci a aby vibrace byly synchronní. Nejnovější výzkum těchto strojů ukázal, že na výkon zařízení má významný vliv tvar rezonátoru. Pokud má zařízení tvar kruhový, je dvakrát tak efektivní, než když je rezonátor obyčejná rovná trubka. To je dáno tím, že tlak a rychlost proudění vzduchu v kruhově tvarovaném prostoru je většinou synchronní. Na výzkumném projektu se pod vedením profesora Symko podílí také studenti. Jedné ze studentek se podařilo vytvořit tak malé zařízení, že je jen o polovinu širší, než je tloušťka mince zvané americký cent. Výkon tohoto miniaturního stroje je přesto obdivuhodný. Po zahřátí produkuje zvuk o síle 120 decibelů[9]. To je zvuk, jakým ječí sirény a nebo pro který si chodíme na rockové koncerty. Je to jedno z nejmenších termoakustických zařízení, které kdy bylo vyrobeno a to zřejmě ještě není konečná hranice. Nicotné rozměry a vysoký výkon otevírají těmto strojům cestu k jejich masové produkci a k jejich širokému využití. Někteří fyzikové hovoří o technologii vysoce efektivních elektráren, automobilech, jejichž chladiče vyrábí proud, elektrických přístrojích zužitkovávajících i ta nejmenší množství odpadního tepla, o nové generaci solárních článků.

Energie z lidské činnosti – další zdroj bez bateriového napájení je záměrná lidská činnost. Mnoho vědců hledalo příležitosti k využití kroucení, třesení, tlačení, motání, pumpování a šubání k pohonu jejich zařízení. Do dnešní doby byla vytvořena spousta mačkácích zařízení z nich za zmínku určitě stojí samonapájecí tlačítko, které vysílá digitálně zakódovanou rádiovou frekvenci od MIT Media Lab (Obr.2.14). Je v něm použito piezoelektrického prvku s hodícím se rezonančním transformátorem a upravenou elektronikou tak, že při stlačení tlačítka generuje přibližně jeden milijoul na tři volty za tlak o síle 15 N, což je dostatek výkonu k běhu digitálního dekodéru rádia na vysílání až do vzdálenosti 50 stop (15,24 m)[2].



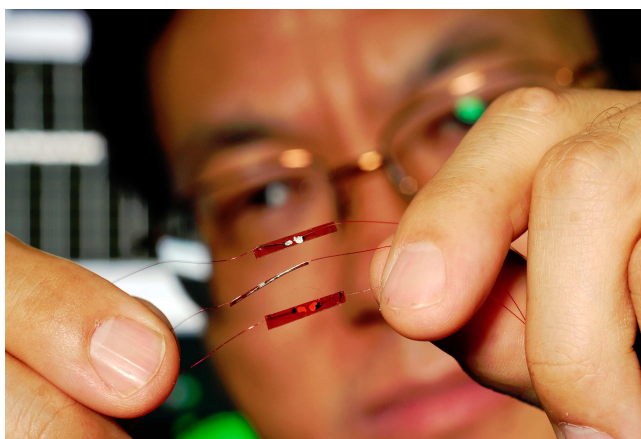
Obr. 2.14: Samonapájecí tlačítko od MIT Media Lab[2].

Stále častěji se dnes k napájení různých zařízení využívá vhodně upravené podrážky obuvi. Příkladem v této kategorii může být Ron Pelrine a jeho tým spolupracovníků z SRI International, kteří vynalezli elektrostatický generátor založený na materiálech nazývaných elektroaktivní polymery či dielektrické elastomery. Vyrobené ze složek jako silikonová guma nebo měkký akryl, tyto materiály jsou extrémně povolné. Jejich stlačení o dva až šest milimetrů je může lehce vymrštit o 50-100 %. Jsou tak ideální náhradou pro gumu používající se na podrážky běžeckých bot. Mohou být schopné dosáhnout v praktických zařízeních hustoty energie 0,2 J/g a výpočty naznačují možnost přiblížit se až k 1,5 J/g. Tým ze SRI International vestavil generátor z elastomeru do paty boty (Obr.2.15). Při pohybu paty dolů a následným stlačením je vyvinut tlak na membránu z elastomeru. Membrána se vzedme v děrách vsazeného rámu a vytváří napětí, a když je toto napětí spotřebováno elektrodami vytváří výkon. Vědci dokázali touto cestou získat výkon 0,8 J z jednoho kroku boty při stlačení pouze tři milimetry, zisk tedy činí 800 mW na jednu botu při frekvenci chůze dva kroky za sekundu[2].



Obr.2.15: Generátor z elastomeru zabudovaný v podrážce boty[2].

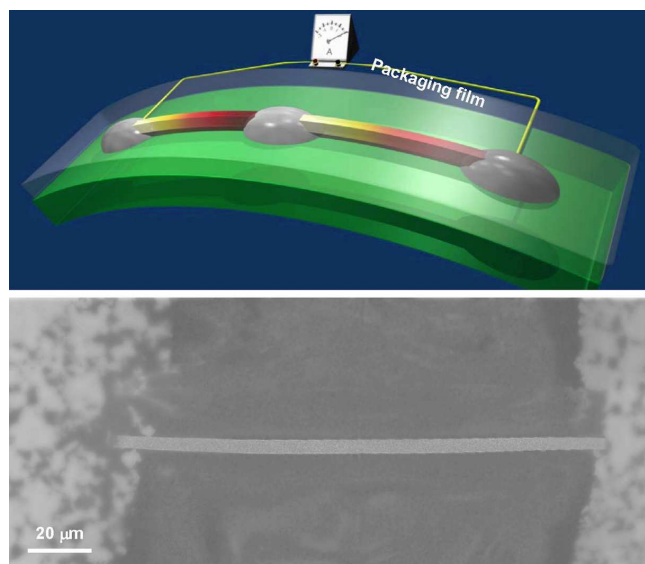
Nedávno laboratorními testy prošel další nový typ miniaturního generátoru střídavého elektrického napětí, pracujícího na základě piezoelektrických vlastností oxidu zinečnatého. Oxid zinečnatý (ZnO) je asi nejznámější ve formě zářivě bílého malířského práškového pigmentu – zinkové běloby. Díky schopnosti absorbovat UVA a i UVB záření se používá i jako složka ochranného faktoru opalovacích krémů. Krystaly ZnO jsou piezoelektrické a termochromatické (při zahřátí mění barvu, v případě ZnO na žlutou). A právě na základě piezoelektrických vlastností oxidu zinečnatého vědci pod vedením profesora Zhong Lin Wanga z Technického ústavu v americkém státě Georgia vytvořili nový typ miniaturního zdroje slabého střídavého elektrického napětí (Obr.2.16).



Obr.2.16: Profesor Zhong Lin Wang s novým typem generátoru střídavého elektrického napětí[11].

Budícím mechanismem je cyklické napínání a uvolňování drobných, tyčinkám podobných krystalů oxidu zinečnatého, připojených na tenké vodiče a kvůli ochraně před vnějším prostředím uzavřených v pružném plastickém materiálu. Jde o jakousi pumpu elektrického náboje, která mechanickou energii přemění na energii elektrickou. Vzniká tak rozměrově velmi malý generátor střídavého napětí až do 45 mV. Jeho účinnost je asi sedm procent, to znamená, že jen sedm setin vynaložené mechanické energie přemění na energii elektrickou. Přesto jde o nadějný směr vývoje napájecích zdrojů pro různé oblasti – například pro jemnou elektrotechniku, pro různá miniaturní monitorovací zařízení a snímače v medicíně, nebo v oblasti životního prostředí. Na kontě Wangova výzkumného týmu je už několik typů mikrovláknových nanogenerátorů, které využívají piezoelektrické vlastnosti krystalů ZnO. Jejich funkce však doposud vyžadovala přímý kontakt snímacích elektrod s povrchem aktivní vrstvy. Problémem je částečná rozpustnost oxidu zinečnatého ve vodě, což snižovalo odolnost těchto zařízení vůči vlhku a komplikovalo jejich konstrukci. "Naše nová pružná pumpa elektrického náboje řeší několik klíčových otázek, vyplývajících z konstrukce našich předcházejících generátorů," upřesňuje Wang. "Nový design odstraňuje problém s pronikáním vlhkosti a opotřebením struktur. Z praktického hlediska je to o hodně výhodnější." Nový miniaturní piezoelektrický generátor napětí je založený na tři až pět tisícín milimetru tenkých vláknech z oxidu zinečnatého s délkou 0,2 až 0,3 milimetrů. Vytváří se metodou vysrážení z plynné fáze (physical vapor deposition method), při které se na vhodně zvoleném povrchu usazuje kondenzát z par příslušného materiálu. V tomto případě jsou zdrojem páry ZnO při teplotě přibližně 600 °C, z kterých kondenzují tenké, tyčinkám podobné krystaly. Pomocí optického mikroskopu se tato jemná vlákna ukládají na polyamidovou fólii. Stříbrný povlak na jejich koncích slouží jako elektroda pro připojení k venkovnímu obvodu. Povrch je zalitý opět do polyamidu, který zařízení chrání před vlhkostí a zničením. Vytvářenou elektrickou energii vědci měřili tak, že na konce tohoto minigenerátoru připojili mechanismus, který ho periodicky ohýbal, čím vytvářel v krystalech tlak vyvolávající piezoelektrický potenciál (Obr.2.17). To vyvolalo tok elektronů směrem do připojeného venkovního elektrického obvodu s měřicími prvky. Při uvolnění napětí proces probíhal

opačným směrem. Tak při periodickém střídání napětí a uvolnění vzniká odpovídající elektrický proud, měnící směr s frekvencí mechanických změn.



Obr.2.17: V horní části je zobrazena ilustrace testu miniaturního piezoelektrického generátoru elektrického napětí. V dolní části je mikrofotografie reálného prototypu[11].

Wang se domnívá, že tuto proudovou frekvenci omezují jen vlastnosti ochranného polyamidového substrátu. Výsledky vědci porovnávali s podobnými experimenty na bázi uhlíkových a kevlarových vláken pokrytých vrstvou polykrystalického oxidu zinečnatého, aby ověřili, či naměřený elektrický proud je opravdu produkován novým zařízením a není jen nějakým externím artefaktem měření. Při těchto porovnávacích pokusech však nenaměřili v elektrickém obvodu žádné změny. Osm různých testů vyloučilo případný omyl. Jednotlivé drobné piezoelektrické generátory se můžou sériově zapájet do vrstev a tyto zase do vícevrstvých modulů, čímž se úměrně zvyšuje i vytvořené elektrické napětí. Využití těchto piezoelektrických modulů by se mohlo odvíjet od existujících zdrojů mechanického tlaku a pnutí a mohli by se stát součástí oděvů, obuvi, dlaždic, stavebních prvků, či dokonce by mohli být implantované do těla jako nezávislý napájecí zdroj pro různé stimulatory, či senzory[11].

2.2 TABULKA MOŽNÝCH ZISKŮ ENERGIE Z RŮZNÝCH OKOLNÍCH ZDROJŮ

Zdroj energie	Výkon	Poznámka
Okolní záření	$< 1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	Mimo blízkosti vysílače
Okolní světlo	$100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ (přímé sluneční záření) $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (osvětlená kancelář)	Běžný polykrystalický solární článek má účinnost 16-17 %, zatímco standardní monokrystalický se blíží účinnosti 20 %. Čísla se však mohou velice lišit v závislosti na intenzitě osvětlení prostředí.
Termoelektrina	$60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	Údaj pro Thermo Life generátor s $\Delta T = 5 \text{ }^\circ\text{C}$; typický termoelektrický generátor má účinnost $\leq 1 \text{ %}$ pro $\Delta T < 40 \text{ }^\circ\text{C}$ [5]
Vibrační mikrogenerátory	$4 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ (lidský pohyb - Hz) $800 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ (stroje - kHz)	Předpoklad pro 1 cm^3 generátory. Velice záleží na povzbuzování generátoru. Rozsáhlejší struktury mohou dosahovat vyšších výkonů.
Okolní proudění vzduchu	$1 \text{ mW}/\text{cm}^2$	Platí pro mikroeletromechanickou turbínu s výkonem 30 l/min
Mačkácí tlačítka	$50 \mu\text{J}/\text{N}$	Uvedeno pro 3 V DC tlačítko od týmu MIT Media Lab[2]
Ruční generátory	30 W/kg	Uvedeno pro Nissho Engineering's Tug Power (1,3 W/kg ze svítilny poháněné třesením)[4]
Došlap paty	7 W (1 cm stlačení při váze 70 kg a 1 Hz chůzi)	Příklady: 800 mW z paty vyrobené z dielektrického elastomeru; 250-700 mW s hydraulickým akčním členem v botách[2]; 10 mW s piezoelektrickou vložkou

Tab.2.1: Tabulka možných zisků energie z různých okolních zdrojů.

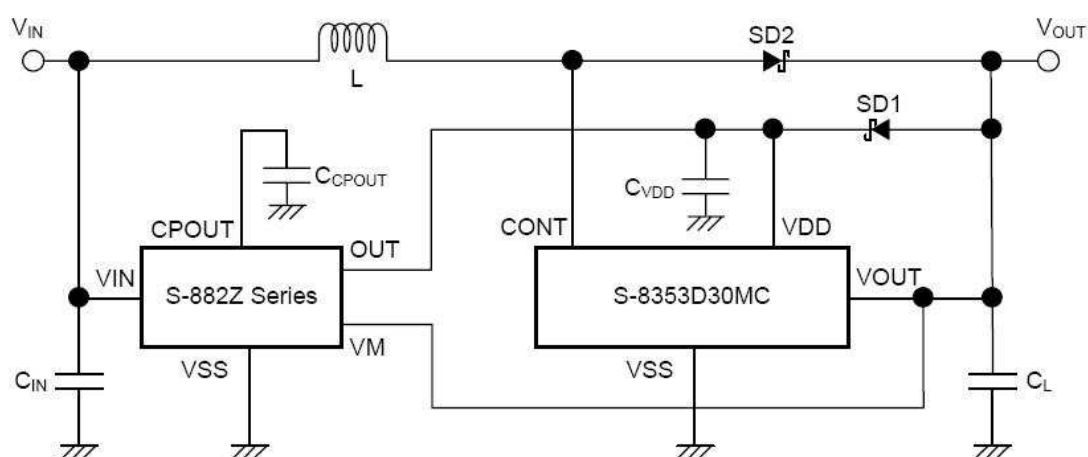
Uvedené údaje velice závisí na okolním prostředí a na technologii, která z něj energii získává. Pro porovnání, lithium-iontová baterie může dát více jak $0,52 \text{ W-hod}/\text{cm}^3$ ($0,18 \text{ W-hod}/\text{g}$) a Toshiba DMFC - direct methanol mini fuel cell (přímo methanolem napájený mini článek) dosahuje výkonu $0,27 \text{ W-hod}/\text{cm}^3$. Teoreticky je možné z methanolu získat $4,8 \text{ W-hod}/\text{cm}^3$ ($6,1 \text{ W-hod}/\text{g}$)[3].

3. DC/DC MĚNIČ SE VSTUPNÍM NAPĚTÍM 0,3 V

Náplní této kapitoly je praktická realizace napětového DC/DC měniče se vstupním napětím $U_{in} = 0,3 \text{ V}$. Návrh a konstrukce DC/DC měniče. Popis základních vlastností integrovaných obvodů Seiko S-882Z a Seiko S-8353, které jsou pro jeho funkci stěžejní. A dále pak popis a dosažené výsledky prováděných měření na DC/DC měniči, zejména závislosti na vnitřní impedanci zdroje napětí..

3.1 NÁVRH A KONSTRUKCE DC/DC MĚNIČE

DC/DC měnič byl navrhnut na základě příkladu aplikačního obvodu z katalogového listu k integrovanému obvodu Seiko S-882Z20[21]. Svými parametry $U_{in} = 0,3 \text{ V}$ (vstupní napětí), $U_{out} = 3,0 \text{ V}$ (výstupní napětí) a $I_{out} = 1 \text{ mA}$ (výstupní proud) plně odpovídá potřebám zadání a není nutné jej nikterak dále upravovat. Ze schématu zapojení (obr. 3.1) je patrné, že měnič je založen na součinnosti dvou integrovaných obvodů značky Seiko. A to nábojové pumpy S-882Z20 a DC/DC měniče S-8353D30MC.



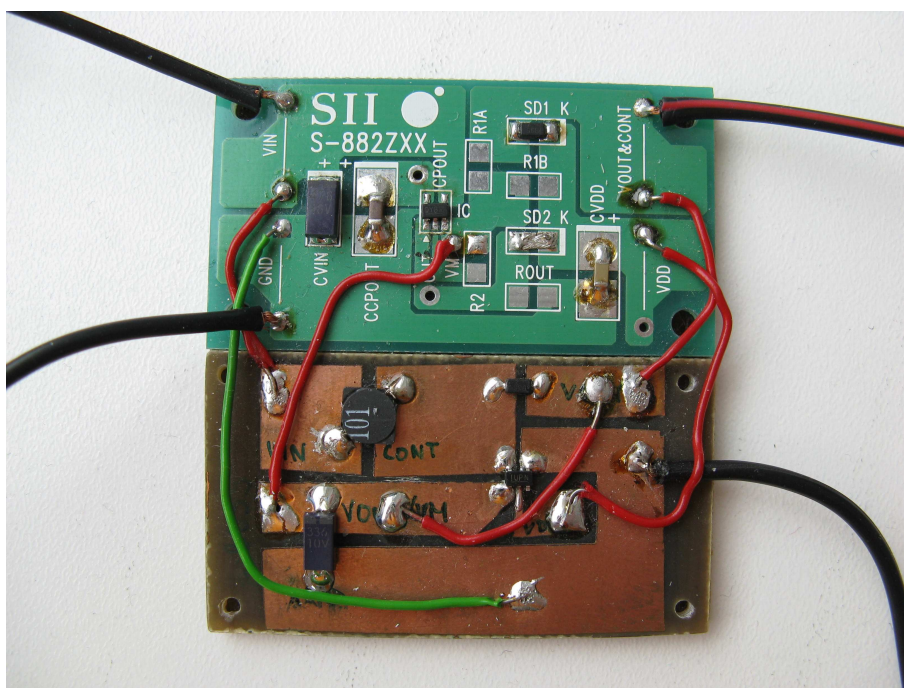
Obr. 3.1: Schéma zapojení DC/DC měniče se vstupním napětím 0,3 V[21].

Tabulka použitých součástek:

Jméno součástky	Symbol	Výrobce	Hodnota (typ)
S-882Z Series	-	Seiko Instruments Inc.	S-882Z20-M5V1G (hodnota počátečního vybíjecího napětí: 2,0V)
Zvyšující DC/DC měnič	-	Seiko Instruments Inc.	S-8353D30MC (výstupní napětí: 3,0 V)
Tlumivka	L	ECM Electronics	CDRH5D18-101 (100 μ H)
Schottkyho dioda	SD1,SD2	Rohm Co.,Ltd.	RB551V-30
Startující kondenzátor	C _{CPOUT}	-	10 μ F (keramický)
Vstupní kondenzátor	C _{IN}	-	47 μ F
Výstupní kondenzátor	C _L	-	33 μ F (ESR > 50 m Ω)
Vyhlazovací kondenzátor	C _{VDD}	-	1 μ F (keramický)

Tab.3.1: Tabulka použitých součástek[21].

Na obr. 3.2 je vidět výsledná podoba DC/DC měniče, jež je zkonstruován z jedné poloviny na původní aplikační desce dodané k integrovanému obvodu S-882Z20 a z druhé pak na jednoduché podomácku vyrobené desce k obvodu S-8353D30MC.



Obr. 3.2: Výsledná podoba DC/DC měniče.

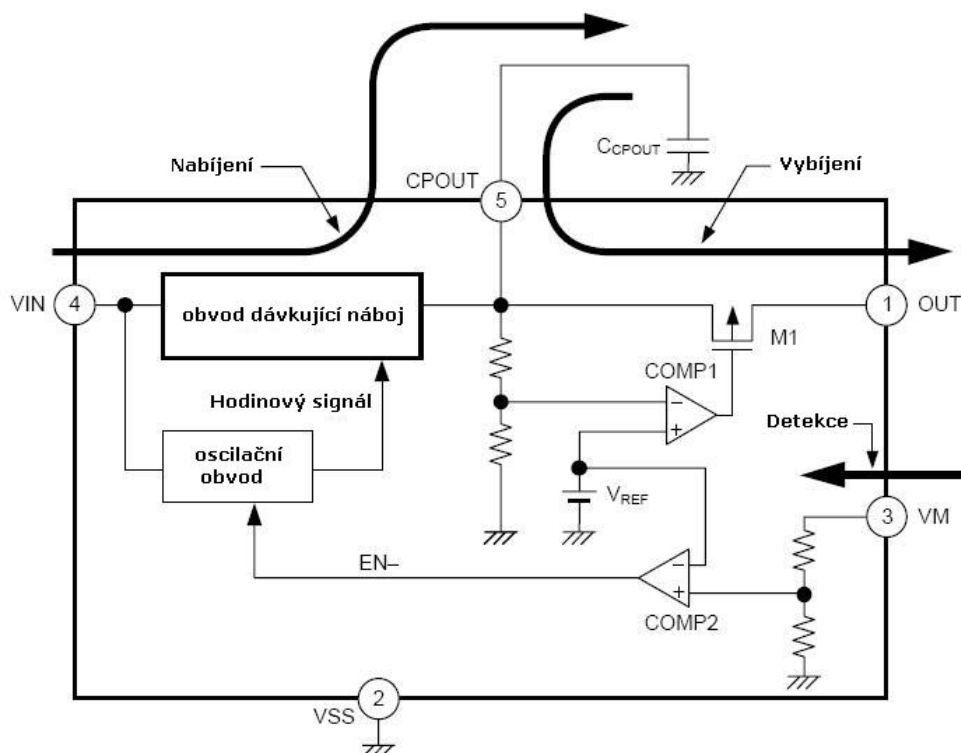
3.1.1 Integrovaný obvod Seiko S-882Z20

Jedná se nejdůležitější prvek DC/DC měniče. Je to v podstatě nábojová pumpa pro navazující zvyšující napěťový měnič S-8353D30MC, která se liší od konvenčních integrovaných obvodů v tom, že plně využívá SOI (Silicon on insulator) technologii, jež právě umožňuje extra nízkonapěťový provoz. Je schopen zvýšit extrémně nízké napětí 0,3 až 0,35 V, to umožňuje účinně využít nízkoenergetických úrovní. Načerpaná energie je uložena v externím startovacím kondenzátoru. Ten je po dosažení určitého náboje vybíjen a jeho energie slouží k nastartování chodu DC/DC měniče. Kromě toho je zkonstruován tak, aby se automaticky zastavil jeho provoz. K jeho zastavení dochází, když už napěťový měnič na svém výstupu produkuje napětí nad zadanou hodnotu. Tím lze dosáhnout významné úspory energie a prodloužení životnosti případné baterie. Další výhodou integrovaného obvodu S-882Z20 jsou jeho malé rozměry dané pouzdrem SOT-23-5, které umožňuje velkou hustotu osazení na desce plošného spoje. Použití integrovaného obvodu S-882Z20 může být různorodé jako například zintenzivnění nízkého napájecího napětí solárních a palivových článků, posílení interního napájecího napětí RF tagu či přerušované napájení nízkonapěťových zařízení.

Vlastnosti IO Seiko S-882Z20[21]

Provozní vstupní napětí	0,3 – 3,0 V
Spotřeba	Během provozu: 0,5 mA max. (pro $U_{in} = 0,3$ V)
	Během vypnutí: 0,6 μ A max. (pro $U_{in} = 0,3$ V)
Počáteční vybíjecí napětí	2,0 V
Vypínací napětí	2,1 V
Oscilační frekvence	350 kHz typ. (pro $U_{in} = 0,3$ V)
Pouzdro	SOT-23-5

Vnitřní schéma IO Seiko S-882Z20 a popis jeho funkce



Obr.3.3: Vnitřní schéma integrovaného obvodu Seiko S-882Z20[21].

- 1) Objeví-li se na pinu VIN napětí 0,3 V nebo vyšší, začíná oscilační obvod kmitat a produkovat na svém výstupu hodinový signál.
- 2) Obvod dávkující náboj je řízen tímto hodinovým signálem a je na něj převedena elektrická energie z pinu VIN .
- 3) Postupným zvyšováním této energie se začíná nabíjet startovací kondenzátor (C_{CPOUT}) připojený na pin CPOUT. A napětí na pinu CPOUT vzrůstá.
- 4) Když, napětí na pinu CPOUT dosáhne nebo přesáhne hodnoty počátečního vybíjecího napětí (2,0 V) se výstup signálu z komparátoru jedna (COMP1) změní z vysoké úrovně na nízkou. Výsledkem je sepnutí spínače M1, který byl doposud vypnut. Spínač M1 tak řídí proces vybíjení.
- 5) Při sepnutí spínače M1 se postupně nashromážděná energie na startovacím kondenzátoru (C_{CPOUT}) začne vybíjet přes pin OUT.

- 6) Jakmile v důsledku vybíjení klesne napětí na výstupu o hodnotu přibližně 0,5 V je pomocí spínače M1 vybíjení zastaveno.
- 7) Pokud napětí na pinu VM dosáhne nebo překročí vypínací napětí (2,1 V) se výstupní signál (EN-) z komparátoru dvě (COMP2) změní z nízké úrovně na vysokou. Výsledkem pak je zastavení oscilačního obvodu a tím i celkové vypnutí obvodu.
- 8) Není-li dosaženo na pinu VM vypínacího napětí, tak obvod neustále nabíjí startovací kondenzátor (C_{CPOUT}).

3.1.2 Integrovaný obvod Seiko S-8353D30MC

IO Seiko S-8353D30MC je zvyšující měnič (zvyšuje tedy výstupní napětí oproti napětí vstupnímu) používající pulzně šířkovou modulaci (PWM- Pulse Width Modulation), což je jedna z nejčastěji používaných metod regulace výkonu, jejíž princip je založen na skutečnosti, že velikost regulační zpětnovazební odchylky v měniči ovládá střidu spínání spínacího prvku měniče. Externími součástkami IO jsou cívka, kondenzátor a dioda. V první části spínacího cyklu se energie ukládá do magnetického pole cívky a zátěž je napájena pouze z energie výstupního kondenzátoru a v druhé části spínacího cyklu je touto energií napájena zátěž a dobíjen výstupní kondenzátor[1].

Vlastnosti IO Seiko S-8353D30MC[22]

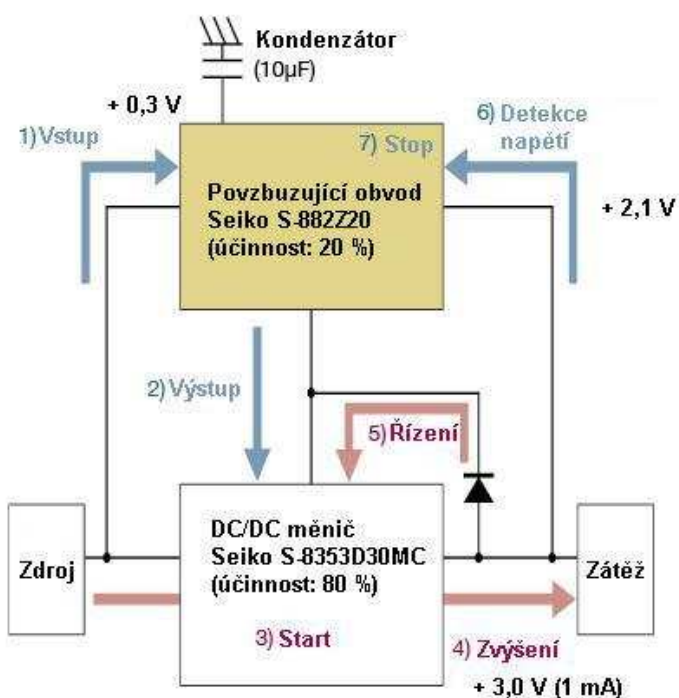
Provozní vstupní napětí	0,9 V min. ($I_{out} = 1 \text{ mA}$)
Spotřeba	Během provozu: 18,7 μA (3,3 V, 50 kHz, typ.)
	Během vypnutí: 0,5 μA (max.)
Střída	15 - 83 %
Výstupní napětí	3,0 V
Přesnost výstupního napětí	$\pm 2,4 \%$
Oscilační frekvence	50 kHz
Funkce měkkého startu	6 ms
Pouzdro	SOT-23-5

3.2 POPIS FUNKCE DC/DC MĚNIČE

Funkci hotového DC/DC měniče se vstupním napětím 0,3 V, jak je vidět na zjednodušeném schématu (obr.3.4), lze popsat v šesti krocích.

- 1) Vstupní napětí je od hodnoty 0,3 V pomocí povzbuzujícího obvodu Seiko S-882Z20 zvyšováno a náboj je ukládán do startovacího kondenzátoru.
- 2) Po dosažení 2,0 V na startujícím kondenzátoru se toto napětí objeví na výstupu povzbuzujícího obvodu.
- 3) 2,0 V na výstupu nábojové pumpy Seiko S-882Z20 uvedou do chodu DC/DC měnič Seiko S-8353D30MC.
- 4) DC/DC měnič zvyšuje napětí na výstupu.
- 5) DC/DC měnič pomocí změny šířky pulsů řídí svoji činnost.
- 6) Povzbuzující obvod automaticky detekuje napětí na výstupu DC/DC měniče a dosáhlo-li hodnoty 2,1 V ukončí svoji činnost a tím podstatně šetří energii.

Úplná operace může trvat kolem osmi sekund.



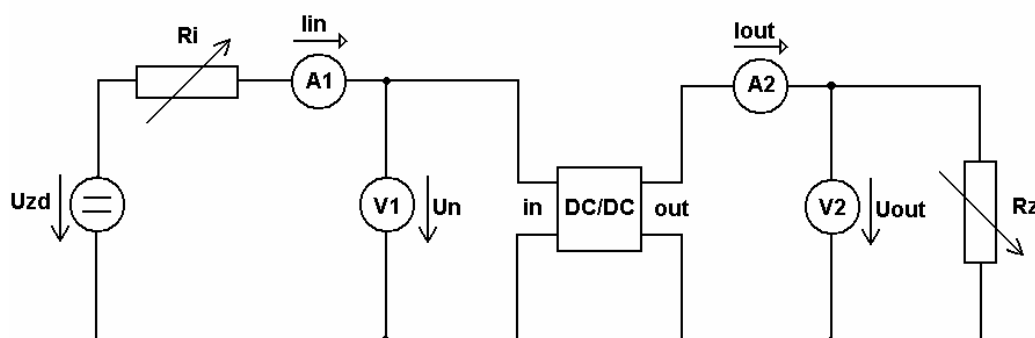
Obr.3.4: Popis funkce DC/DC měniče[21].

3.3 POPIS A VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA DC/DC MĚNIČI

V této části je uveden popis a dosažené výsledky jednotlivých laboratorních měření prováděných na DC/DC měniči.

3.3.1 Měření závislosti výkonu a účinnosti DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích a vnitřním odporu zdroje při spojitě činnosti napěťového měniče

Schéma zapojení je patrné na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Schéma zapojení.

Popis měření je následující. Ampérmetr A2 a voltmetr V2 měří hodnoty proudu a napětí na výstupu DC/DC měniče, z nichž je vypočítán výstupní výkon. Voltmetrem V1 je hlídáno napájecí napětí U_n a pomocí regulovatelného zdroje je udržováno na konstantních hodnotách 0,3 V; 0,5 V; 0,7 V a 0,9 V při jednotlivých měřeních. Měření je prováděno pro různé velikosti zatěžovacího odporu R_z v rozsahu 0,1 – 50 k Ω , který je nastavován na odporové dekádě. Vnitřní odpor zdroje R_i se nastavuje na příslušné odporové dekádě na hodnoty v rozsahu 0 – 500 Ω a zůstává vždy pro celou sadu napájecích napětí konstantní. Ampérmetr A1 měří hodnotu vstupního proudu, díky němuž lze dopočítat účinnost měniče.

Seznam použitých přístrojů při měření:

ZDROJ..... Agilent E3631A ev.č.:MY 40004105
 A1..... Multimetr Agilent 34401A ev.č.:MY 44002642
 V1..... Multimetr HP34401A ev.č.: 3146A40362
 A2..... Multimetr Agilent 34401A ev.č.:MY 44002660
 V2..... Multimetr HP34401A ev.č.: US36065221
 Ri..... Odporová dekáda XL6 ev.č.: 4370200072
 Rz..... Odporová dekáda XL6 ev.č.: 4370200067

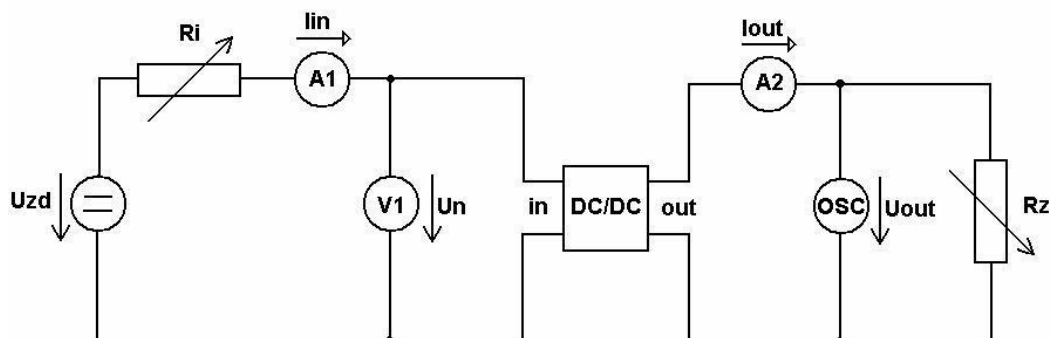
Veškeré tabulky a grafy vztahující se k tomuto měření jsou uvedeny v příloze č. 1. Z grafů závislosti výkonu DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích a $R_i = 0 \Omega$ a $R_i = 10 \Omega$ je patrné, že jsou téměř shodné a že s rostoucí hodnotou zatěžovacího odporu R_z výkon DC/DC měniče exponenciálně klesá. Zvlnění grafů v počátcích měření je zapříčiněno tím, že DC/DC měnič začíná dlouhodobě pracovat až od velikosti zátěže $R_z = 1 \text{ k}\Omega$.

Z grafů závislosti účinnosti DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích, lze pozorovat, že účinnost měniče s vzrůstajícím napájecím napětím roste z přibližně 64 % pro $U_n = 0,3 \text{ V}$ až na 76 % pro $U_n = 0,9 \text{ V}$, což jsou pro tento druh DC/DC měniče velice přijatelné hodnoty. Maximálních účinností měniče pak bylo dosaženo pro zátěže R_z v rozmezí 3 – 7 $\text{k}\Omega$.

DC/DC měnič bylo nemožné udržet v dlouhodobé činnosti pro vnitřní odpory R_i větší než 20 Ω , proto byla změřena závislost minimálního potřebného napájecího napětí U_n k dlouhodobému chodu DC/DC měniče při různém vnitřním odporu zdroje R_i a zátěži $R_z = 3 \text{ k}\Omega$ (Hodnota zátěže $R_z = 3 \text{ k}\Omega$ byla v tomto případě zvolena na základě zjištění, že při ní dosahuje měnič nejvyšší účinnosti.). Ta, jak je vidět lineárně roste. Pro vnitřní impedanci zdroje $R_i = 20 \Omega$ je třeba napájecí napětí $U_n = 0,46 \text{ V}$, ale už pro $R_i = 100 \Omega$ je nutné $U_n = 1,99 \text{ V}$. Takto vysoké napájecí napětí už není z hlediska určení měniče zajímavé, a proto nemá cenu provádět následující měření pro vnitřní impedance zdroje vyšší než $R_i = 100 \Omega$.

3.3.2 Měření závislosti výkonu DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích a vnitřním odporu zdroje při nespojitě činnosti napěťového měniče

Smyslem následujícího měření je popsat chování DC/DC měniče ještě předtím, než začne fungovat spojitě a to v závislosti na vnitřním odporu zdroje R_i při dvou různých napájecích napětích $U_n = 0,3 \text{ V}$, $U_n = 0,5 \text{ V}$ a měnícím se odporu zátěže R_z . Schéma zapojení (obr.3.6) vychází ze schématu z předchozího měření (obr. 3.5), jen voltmetr V2 je nahrazen osciloskopem (OSC) Tektronix TDS 2014B.



Obr. 3.6: Schéma zapojení s osciloskopem.

Postup měření je obdobný jako při předchozím měření (3.3.1). Ampérmetr A1 měří hodnotu vstupního proudu. Voltmetrem V1 je hlídáno napájecí napětí U_n a pomocí regulovatelného zdroje je udržováno na konstantních hodnotách $0,3 \text{ V}$ a $0,5 \text{ V}$ při jednotlivých měřeních. Vnitřní odpor zdroje R_i se nastavuje na příslušné odporové dekádě na hodnoty v rozsahu $10 - 100 \Omega$ a zůstává vždy pro dané napájecí napětí konstantní. Měření je prováděno pro různé velikosti zatěžovacího odporu R_z v rozsahu $0,1 - 50 \text{ k}\Omega$, který je nastavován na odporové dekádě. Ampérmetr A2 měří proud na výstupu měniče. Na osciloskopu je zobrazován a ukládán průběh výstupního napětí na čas a pomocí kurzorů odečítány hodnoty maximálního výstupního napětí U_{outmax} při čase trvání τ_{Uoutm} a středního napětí U_{out} trvajících dobu τ_{Uout} . Pro tato napětí je pak vypočítán maximální výkon P_{outmax} a střední výkon P_{out} .

Vybrané tabulky, grafy a zaznamenané průběhy z osciloskopu Tektronix jsou umístěny v příloze č. 2. Ze zkonstruovaných grafických závislostí výkonu P_{out} a maximálního výkonu P_{outmax} DC/DC měniče na velikosti zátěže R_z při $U_n = 0,3 \text{ V}$, $U_n = 0,5 \text{ V}$ a různých vnitřních impedancích zdroje R_i vyplývají následující skutečnosti.

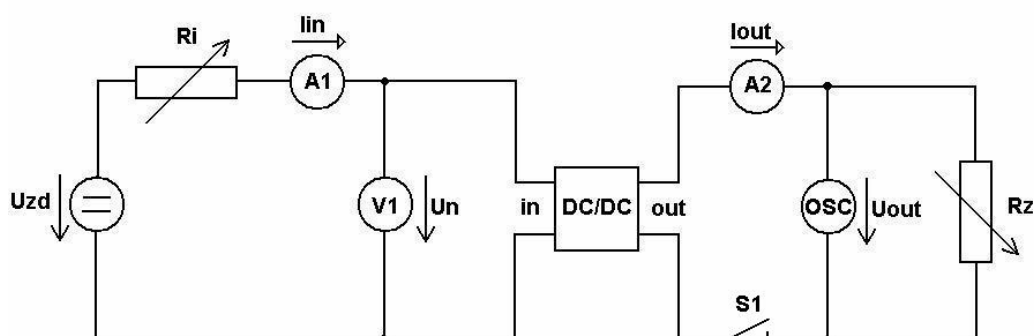
- Výkon měniče s rostoucí vnitřní impedancí zdroje R_i rapidně klesá. Například pro napájecí napětí $U_n = 0,3 \text{ V}$, odpor zátěže $R_z = 3 \text{ k}\Omega$ a vnitřní impedanci zdroje $R_i = 30 \text{ }\Omega$ je výkon $P_{outmax} = 279 \text{ }\mu\text{W}$, zatímco při stejném napájecím napětí a odporu zátěže, ale vyšší impedanci zdroje o $20 \text{ }\Omega$ tj. $R_i = 50 \text{ }\Omega$ je výkon $P_{outmax} = 98 \text{ }\mu\text{W}$, tedy méně než poloviční.
- S rostoucím odporem zátěže R_z výkon měniče pozvolna klesá.
- S navýšením napájecího napětí měniče z $U_n = 0,3 \text{ V}$ na $U_n = 0,5 \text{ V}$, při zachování všech ostatních parametrů, jeho výkon až třikrát vzroste.

Z osciloskopu získaných průběhů lze velice detailně pozorovat chování DC/DC měniče.

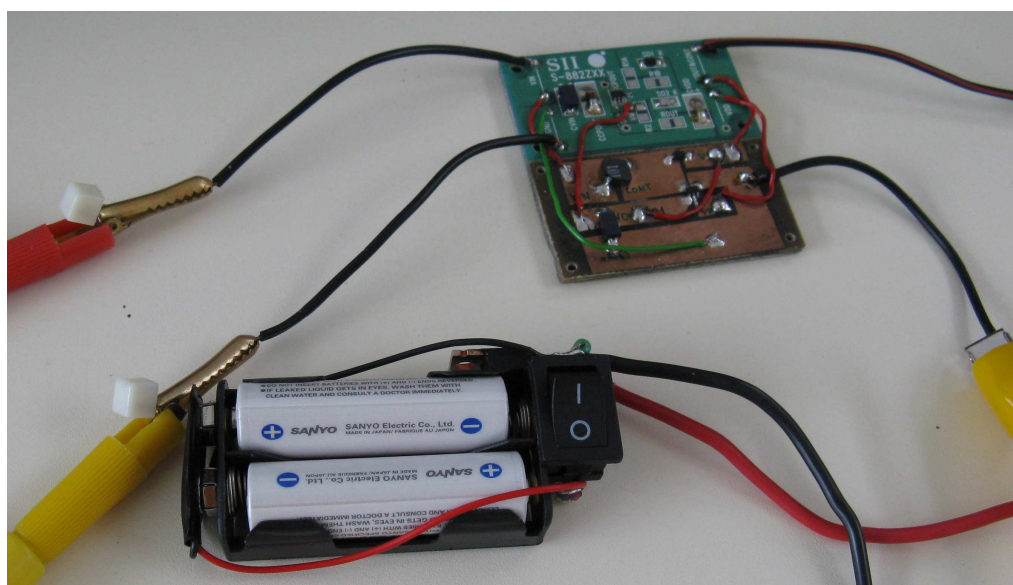
- S nárůstem napájecího napětí měniče z $U_n = 0,3 \text{ V}$ na $U_n = 0,5 \text{ V}$ se značně zvýší perioda napěťových špiček z přibližně šesti sekund pro napájecí napětí $U_n = 0,3 \text{ V}$ na asi jednu sekundu pro napájecí napětí $U_n = 0,5 \text{ V}$. A zároveň dochází ke spojitě práci DC/DC měniče při nižším zatěžovacím odporu R_z .
- Se zvýšením zatěžovacího odporu R_z se při jednotlivých napájecích napětích U_n zvyšuje úroveň výstupního napětí až na žádanou hodnotu $U_{out} = 3 \text{ V}$.
- S rostoucí vnitřní impedancí zdroje R_i se pro dané napájecí napětí U_n a velikost zatěžovacího odporu R_z , zřetelně snižuje úroveň výstupního napětí U_{out} .

3.3.3 Odezvy výstupního napětí DC/DC měniče na připojení a odpojení zatěžovacího odporu

Smyslem tohoto experimentu je získat odezvy výstupního napětí DC/DC měniče na spínání a rozepínání různých zatěžovacích odporů R_z pro dvě vstupní napájecí napětí $U_n = 0,3 \text{ V}$, $U_n = 0,5 \text{ V}$ a měnící se impedanci zdroje R_i . A na jejich základě zjistit, jak dlouho by bylo možné udržet v provozu některý z nízkoenergetických mikrokontrolérů jako například mikrokontrolér z rodiny MSP430 od Texas Instruments. Schéma zapojení je patrné z obr. 3.7. Ke spínání a rozepínání zátěže byl sestrojen přípravek s tranzistorem mosfet (obr. 3.8) tak, aby neovlivňoval výsledné odezvy.

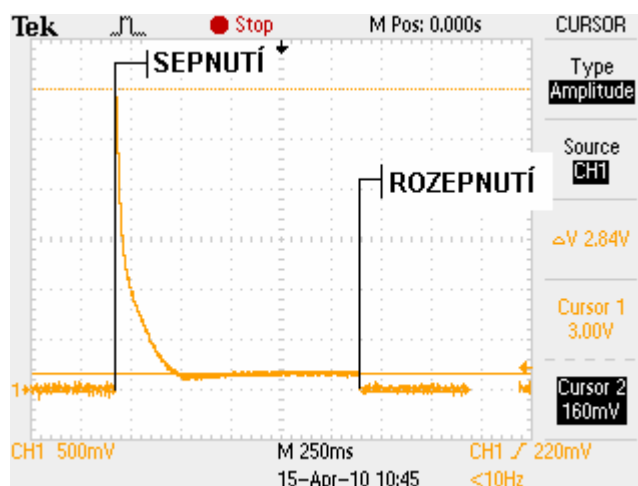


Obr. 3.7: Schéma zapojení s osciloskopem a spínačem.



Obr. 3.8: Přípravek na spínání a rozepínání zátěže DC/DC měniče s tranzistorem mosfet.

Postup měření je téměř shodný s uvedeným v předchozím měření (3.3.2). Jen je na osciloskopu zobrazen a uložen průběh výstupního napětí DC/DC měniče při sepnutí a následném rozepnutí zatěžovacího odporu R_z (viz. obr. 3.9).



Obr. 3.9: Příklad sepnutí a rozepnutí zátěže $R_z = 1 \text{ k}\Omega$ pro $U_n = 0,3 \text{ V}$ a $R_i = 30 \Omega$.

Veškeré odezvy na spínání a rozepínání zátěže DC/DC měniče jsou uvedeny v příloze č. 3.

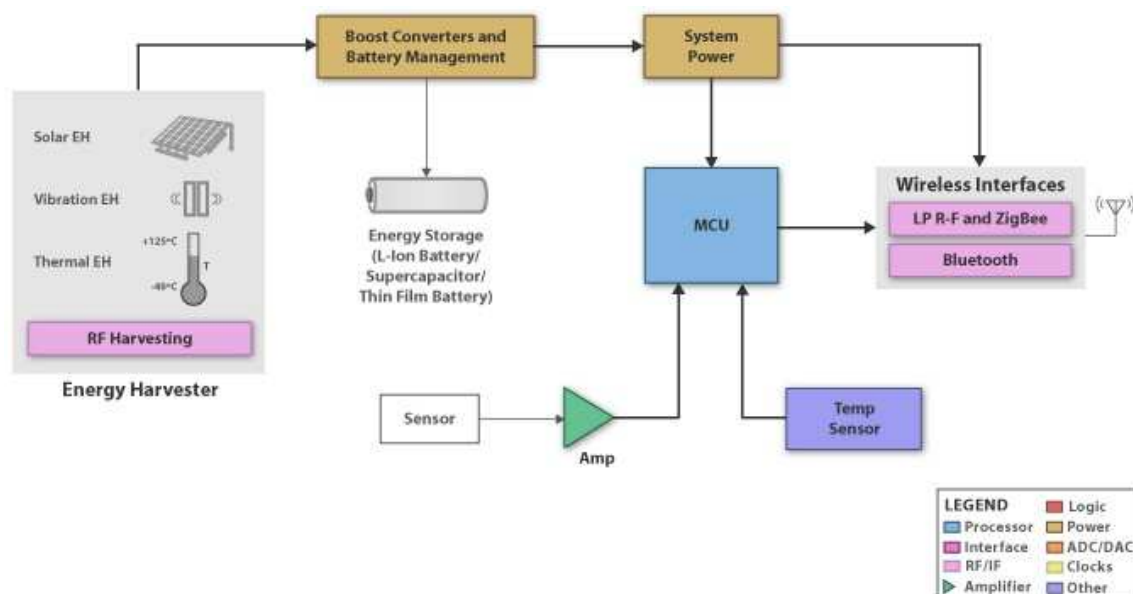
Výsledky tohoto experimentu jsou shrnuty v tabulce tab. 3.2, která udává jak dlouho je teoreticky možné DC/DC měničem udržet v provozu mikrokontrolér z rodiny MSP430 od Texas Instruments. Jehož nejnižší možné napájecí napětí je 1,8 V a aktivní spotřeba menší než 160 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ a jen 1,5 μA v pohotovostním režimu.

		$U_n = 0,3\text{V}$					$U_n = 0,5\text{V}$				
		$R_i [\Omega]$					$R_i [\Omega]$				
		10	30	50	70	100	10	30	50	70	100
$R_z [\text{k}\Omega]$	1	stále	50ms	10ms	5ms	2ms	stále	50ms	30ms	20ms	5ms
	3	stále	100ms	50ms	50ms	20ms	stále	stále	75ms	50ms	30ms
	7	stále	stále	150ms	100ms	75ms	stále	stále	stále	200ms	120ms
	10	stále	stále	350ms	175ms	100ms	stále	stále	stále	stále	200ms

Tab. 3.2: Teoretické doby provozu mikrokontroléru z rodiny MSP430 od TI.

4. NÁVRH SYSTÉMU ENERGY HARVESTING OD TI

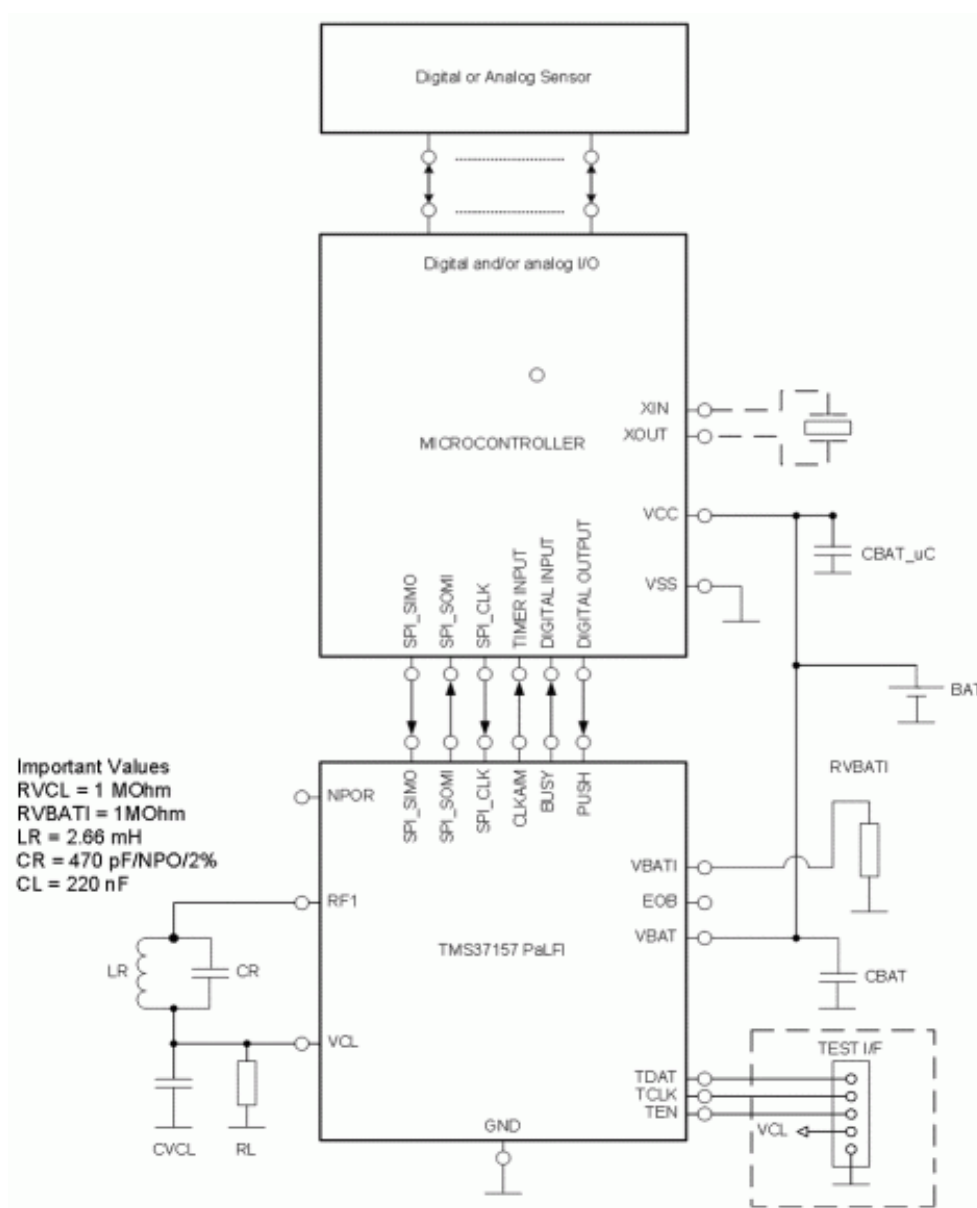
Systém Energy Harvesting od Texas Instruments, jak je vidět na obr. 3.10, je složen z modulu pro získání elektrické energie, mikrokontroléru, případně vysokofrekvenčního vysílače pro přenos dat. Elektrická energie v úrovni mW je zde získávána podle možností ze světla, vibrací, tepelných nebo biologických zdrojů. Možný zdroj energie pochází i z vysokofrekvenčního elektromagnetického vlnění, vyzařovaného z blízkých vysílačů a mobilních základnových stanic BTS. Získaná elektrická energie je dále upravena a uložena v bateriích, efektivních a rychle se nabíjejících kondenzátorech nebo v jedné z právě vyvíjených tenkých baterií.



Obr. 3.10: Energy Harvesting systém navržený firmou Texas Instruments[17].

Řídící mikrokontrolér je z režimu s nízkou spotřebou probouzen v požadovaných intervalech, aby získal hodnoty z připojených senzorů, případně vykonal jiné operace, vše samozřejmě v kompletně nízkonapěťovém systému. Získaná data jsou po zpracování předána do základnové stanice k dalšímu zpracování či archivaci. Tento druh systému Energy Harvesting tak zcela eliminuje závislost na výkonu napájecí baterie a snižuje potřebu systému.

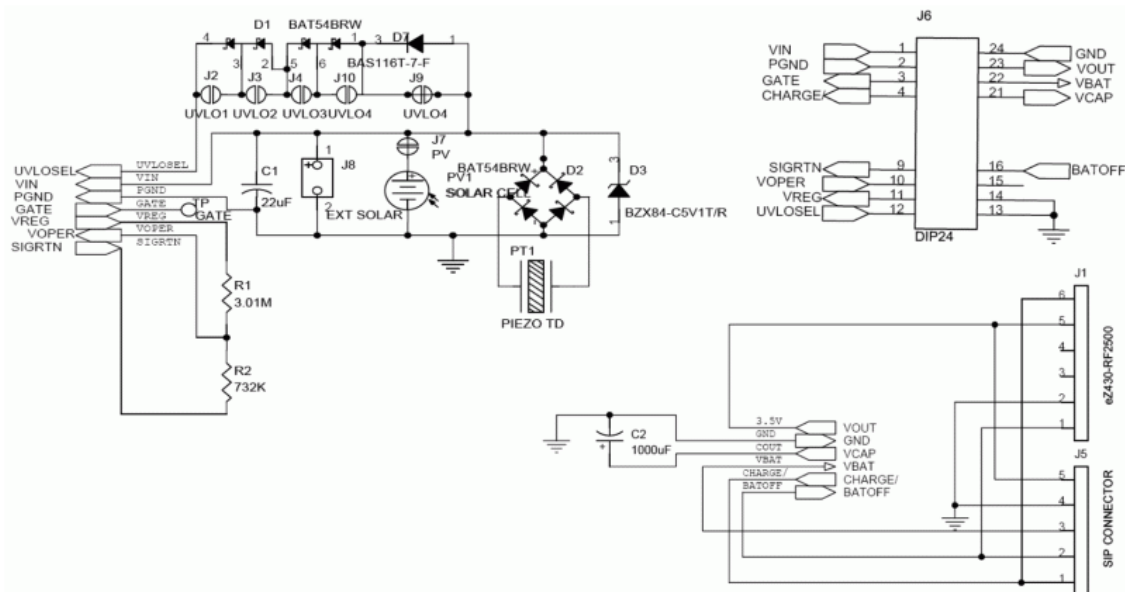
Že nejde o žádný futuristický nápad dokládají například dostupné prvky z produkce společnosti Texas Instruments. Již dříve představené rozhraní PaLFI s obvodem TMS37157 by mohlo být použito jako jeden ze zdrojů elektrické energie z elektromagnetického vlnění. Mikrokontrolér z rodiny MSP430 a nízkonapěťový RF prvek v kombinaci s DC/DC konvertorem a Battery Managementem jsou díky svým vlastnostem ideálním doplňkem pro tyto nízkoenergetické napájecí zdroje.



Obr. 3.11: Rozhraní PaLFI s obvodem TMS37157[17]

Při méně než $160 \mu\text{A} / \text{MHz}$ aktivní spotřeby a sotva $1,5 \mu\text{A}$ v pohotovostním režimu, umožňují obvody MSP430F5xx MCU mnohem delší výdrž napájecí baterie. V případě systému Energy Harvesting, tedy bez napájecí baterie poté umožní efektivní využití energie získané z fotovoltického článku, vibrací či teplotních rozdílů, vznikajících působením lidského organismu. Nízké napětí pro nastartování u rodiny TPS612xx umožňuje aktivaci Energy Harvesting systému na menší napětí. Texas Instruments RF vysílače, pracující na frekvencích 2,4 GHz nebo pod 1 GHz jsou velmi vhodné pro použití ve spolehlivých bezdrátových aplikacích[23].

Texas Instruments USB nástroj eZ430-RF2500 nabízí hardware a software k programování MSP430 MCU a nízkopříkonový bezdrátový vysílač na desce, ne větší než je poštovní známka. Na následujícím obrázku (obr.3.12) je schéma zapojení Solar Energy Harvester Module z dokumentace k eZ430-RF2500[17].



Obr. 3.12: Solar Energy Harvester Module z eZ430-RF2500[17].

5. ZÁVĚR

Obsah předchozího textu mé bakalářské práce naznačuje možnosti použití moderních technologií a výsledků výzkumu k bezbateriovému pohonu snímačů. Bezbateriový pohon snímačů by tak mohl dát prostor novým aplikacím, které nebylo možné dříve realizovat s tradičními systémy a bateriovým napájením. Od napájení hodin zeleninou k využití vibrací z automobilu pro napájení senzorů až po solárně napájené bezdrátové senzory, využitelné pro monitoring v zemědělství či dokonce využití vibrací vznikajících při tlukotu srdce pacienta k napájení implantovaného kardiostimulátoru. Na druhé straně ovšem asi není v zájmu některých velkých společností příliš rychlé zavádění novinek a inovací do praxe. Takový postup s sebou nese jistě potřebu investic do výzkumu a aplikace jeho výsledků. Tím by však mohly podstatným způsobem klesnout zisky těchto podniků. V současné době se však už objevují první „vlastovky“ v podobě například společnosti Emerson Process Management, která představila několik funkčních přístrojů pro bezbateriové napájení provozních zařízení na začátku roku 2005 a od roku 2008 je postupně zavádí do praxe.

Z výsledků provedených měření na zkonstruovaném DC/DC měniči se vstupním napájecím napětím $U_n = 0,3 \text{ V}$ je patrné, že i pro tak nízké napájecí napětí je za dodržení jistých parametrů reálně použitelný k napájení navazující elektroniky jako například nízkoenergetického mikrokontroléru z rodiny MSP430 od Texas Instruments. Parametr, jež je nutné dodržet je co možná nejnížší impedance zdroje napětí, která by měla být nižší než $R_i = 100 \Omega$, ideálně kolem $R_i = 10 \Omega$. Dále je vhodné zajistit odpor zátěže v rozmezí $R_z = 3 - 7 \text{ k}\Omega$, kdy DC/DC měnič vykazuje svou nejvyšší účinnost, přibližně 64 % (pro $U_n = 0,3 \text{ V}$), což je dle mého názoru pro tento druh DC/DC měniče velice přijatelná hodnota.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] KREJČÍŘÍK, A. *DC/DC měniče*. 1.vyd. Praha: BEN, 2001. 112 s. ISBN 80-7300-045-8.
- [2] PARADISO,A.; STARNER, T. *Energy scavenging for mobile and wireless electronics*. [online]. 2009-10-28; 17:40. Pervasive computing. Dostupné z: <http://www.computer.org/pervasive>
- [3] JONES,G.;WHITE,M. *Self-powered systems: a review of energy sources* . [online]. 2009-10-28; 18:25. MCB University Press. ISSN 0260-2288. Dostupné z: <http://www.emerald-library.com/ft>
- [4] KOYAMA,D.;NAKAMURA,K. *Electric power generation a vibration of polyurea piezoelectric thin film*. [online]. 2009-12-08; 7:07. IEEE Zplode
- [5] PHILIPOSE,M.; SMITH, J. *Battery-free wireless identification and sensing*. [online]. 2009-11-8; 12:20. Pervasive computing. Dostupné z: <http://www.computer.org/pervasive>
- [6] FIALA,P. *Koncepce gravitačního mikrogenerátoru* Výzkumná zpráva, průběžná, č.4/02, , UTEE-Laboratoř modelování a optimalizace polí v elektromagnetických systémech, FEKT VUT Brno, 1.12.2002.
- [7] BEEBY, S. P. et al.: *Micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting*. . [online]. 2009-12-08; 11:07. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, vol. 17, June, pp. 1257–1265.
- [8] ERHART,J. *Elektromechanické jevy*. [online]. 2009-12-08; 8:17. Časopis třípól. Dostupné z: <http://www.tretipol.cz/812-piezoelektrina-a-dalsi-elektromechanicke-jevy>
- [9] PAZDERA,J. *Zvuk jako cesta k přeměně tepla na elektřinu*. [online]. 2010-05-12; 9:17. Informační bulletin OSEL Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=2706>
- [10] BISKUP,P. *BMW-Využití odpadního tepla*. [online]. 2010-05-12; 10:17. Informační bulletin AUTO MOTO REVUE.Dostupné z: <http://www.automotorevue.cz/auto/technika/bmw-vyuziti-odpadniho-tepla.html>
- [11] GREGOROVA,D. *Aj kroky môžu byť zdrojom elektrickej energie*. [online]. 2010-05-18; 13:17. Informační bulletin OSEL Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=4075>
- [12] PAZDERA,J. *Osobní tělový generátor made in Singapore*. [online]. 2010-05-18; 13:47. Informační bulletin OSEL Dostupné z: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=5018>

- [13] ANONYM. *Fotovoltaika princip*. [online]. 2010-05-18; 10:53. Česká solární s.r.o.
Dostupné z: http://www.ceska-solarni.cz/fotovoltaika_princip.php
- [14] ANONYM. *Hodiny ATMOS*. [online]. 2010-05-18; 11:03. La Boutique Suisse s.r.o.
Dostupné z: <http://www.lbsprague.cz/hodinky-a-sperky/jaeger-lecoultre/hodinky/atmos-phases-de-lune>
- [15] ANONYM. *Rain harvesting* [online]. 2009-11-02; 13:25.
Dostupné z: <http://www.physorg.com/news120216714.html>
- [16] ANONYM. *RFID*. [online]. 2009-12-08; 8:47. Webová encyklopedie.
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/RFID>
- [17] ANONYM. *Návrh systému Energy Harvesting* [online]. 2010-01-26; 9:32. Informační bulletin Pandatron. Dostupné z:
http://pandatron.cz/?1215&navrh_systemu_energy_harvesting
- [18] ANONYM. *Will power harvesting replace batteries*. [online]. 2009-11-26; 8:17
Informační bulletin GlobalSpec. Dostupné z:
<http://cr4.globalspec.com/blogentry/10792/Will-Power-Harvesting-Replace-Batteries>
- [19] ANONYM. *Wireless power harvesting for cell phones*. [online]. 2009-12-08; 8:47
Informační bulletin Engadget. Dostupné z:
<http://fatknowledge.blogspot.com/2009/06/wireless-power-harvesting-for-cell.html>
- [20] ANONYM. *Power harvesting*. [online]. 2009-12-20; 19:23. Webová encyklopedie.
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/power-harvesting>
- [21] ANONYM. *Katalogový list SEIKO S-882Z*. [online]. 2009-08-29; 13:25.
Seiko Instruments Inc.
Dostupné z: http://datasheet.sii-ic.com/en/charge_pump_ic/S882Z_E.pdf
- [22] ANONYM. *Katalogový list SEIKO S-8353*. [online]. 2009-08-29; 13:35.
Seiko Instruments Inc.
Dostupné z: http://datasheet.sii-ic.com/en/switching_regulator/S8353_8354_E.pdf
- [23] ANONYM. *Katalogový list TI CC430F5137*. [online]. 2009-08-29; 13:35.
Texas Instruments.
Dostupné z: <http://focus.ti.com/lit/er/slaz052b/slaz052b.pdf>

SEZNAM PŘÍLOH

1. Tabulky a grafy k měření závislosti výkonu a účinnosti DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích a vnitřním odporu zdroje při spojitě činnosti napěťového měniče.
2. Tabulky a grafy k měření závislosti výkonu DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích a vnitřním odporu zdroje při nespojitě činnosti napěťového měniče.
3. Odezvy výstupního napětí DC/DC měniče na spínání a rozepínání zatěžovacího odporu

Příloha č.1:

Tabulky a grafy závislosti výkonu DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích U_n a vnitřním odporu zdroje $R_i=0\Omega$:

$R_i = 0 \Omega$
 $U_n = 0,3 \text{ V}$

Rz	lin	Uout	Iout	Pout	η
[k Ω]	[mA]	[V]	[mA]	[mW]	[%]
0,1	1,2	0,12	1,09	0,13	36,33
0,5	2,6	0,22	2,10	0,46	59,23
1,0	20,1	1,92	1,90	3,65	60,50
1,5	20,0	2,38	1,59	3,78	63,07
2,0	19,9	2,78	1,38	3,84	64,26
2,5	19,3	3,01	1,20	3,61	62,38
3,0	15,1	3,01	1,00	3,01	66,45
3,5	13,5	3,01	0,86	2,59	63,92
4,0	11,7	3,01	0,75	2,26	64,32
4,5	10,6	3,01	0,67	2,02	63,42
5,0	9,3	3,01	0,60	1,81	64,73
5,5	8,7	3,01	0,55	1,66	63,43
6,0	7,8	3,01	0,50	1,51	64,32
6,5	7,5	3,01	0,46	1,38	61,54
7,0	6,8	3,01	0,43	1,29	63,45
7,5	6,3	3,01	0,40	1,20	63,70
8,0	5,9	3,01	0,37	1,11	62,92
9,0	5,4	3,01	0,34	1,02	63,17
10,0	4,9	3,01	0,30	0,90	61,43
20,0	2,7	3,01	0,15	0,45	55,74
50,0	1,3	3,01	0,06	0,18	46,31

$R_i = 0 \Omega$
 $U_n = 0,5 \text{ V}$

Rz	lin	Uout	Iout	Pout	η
[k Ω]	[mA]	[V]	[mA]	[mW]	[%]
0,1	55,00	1,02	8,21	8,37	30,45
0,2	45,00	1,71	8,32	14,23	63,23
0,3	38,00	1,91	6,24	11,92	62,73
0,4	36,00	2,16	5,39	11,64	64,68
0,5	34,60	2,39	4,76	11,38	65,76
0,6	34,90	2,64	4,38	11,56	66,26
0,7	33,90	2,81	3,40	9,55	56,37
0,8	32,20	3,00	3,66	10,98	68,20
0,9	29,10	3,00	3,30	9,90	68,04
1,0	26,60	3,00	2,99	8,97	67,44
1,5	17,50	3,01	2,00	6,02	68,80
2,0	12,80	3,01	1,50	4,52	70,55
2,5	10,41	3,01	1,20	3,61	69,39
3,0	8,69	3,01	1,00	3,01	69,28
3,5	7,36	3,01	0,86	2,59	70,34
4,0	6,51	3,01	0,75	2,26	69,35
4,5	5,77	3,01	0,67	2,02	69,90
5,0	5,17	3,01	0,60	1,81	69,86
6,0	4,39	3,01	0,50	1,51	68,56
7,0	3,76	3,01	0,43	1,29	68,85
8,0	3,30	3,01	0,37	1,11	67,50
9,0	3,02	3,01	0,34	1,02	67,77
10,0	2,73	3,02	0,30	0,91	66,37
50,0	0,73	3,02	0,06	0,18	49,64

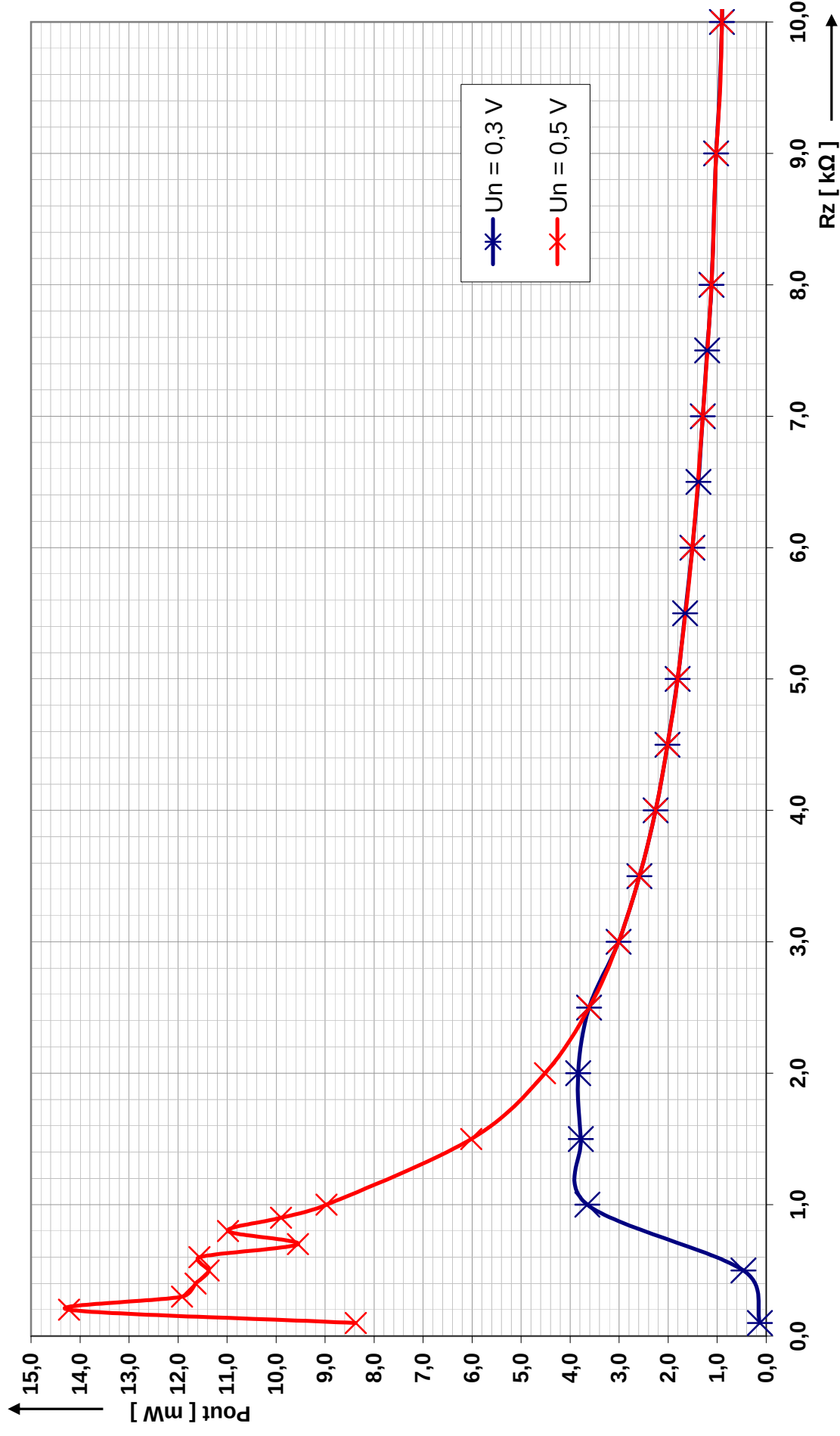
$R_i = 0 \Omega$
 $U_n = 0,7 \text{ V}$

Rz	lin	Uout	Iout	Pout	η
[k Ω]	[mA]	[V]	[mA]	[mW]	[%]
0,08	118,35	1,74	21,09	36,70	44,30
0,10	109,95	1,99	19,58	38,96	50,63
0,20	59,18	2,34	11,54	27,00	65,19
0,30	45,80	2,56	8,49	21,73	67,79
0,50	35,95	2,99	5,56	16,62	66,06
0,70	25,46	3,00	4,28	12,84	72,05
1,00	17,86	3,00	2,99	8,97	71,75
1,50	11,78	3,01	2,00	6,02	73,01
2,00	8,89	3,01	1,50	4,52	72,55
2,50	7,13	3,01	1,20	3,61	72,37
3,00	5,74	3,01	0,98	2,95	73,41
3,50	5,01	3,01	0,84	2,53	72,10
4,00	4,47	3,02	0,75	2,27	72,39
5,00	3,58	3,02	0,60	1,81	72,31
6,00	3,05	3,02	0,50	1,51	70,73
7,00	2,62	3,02	0,43	1,30	70,81
8,00	2,31	3,02	0,38	1,15	70,97
9,00	1,99	3,02	0,32	0,97	69,38
10,00	1,87	3,02	0,30	0,91	69,21

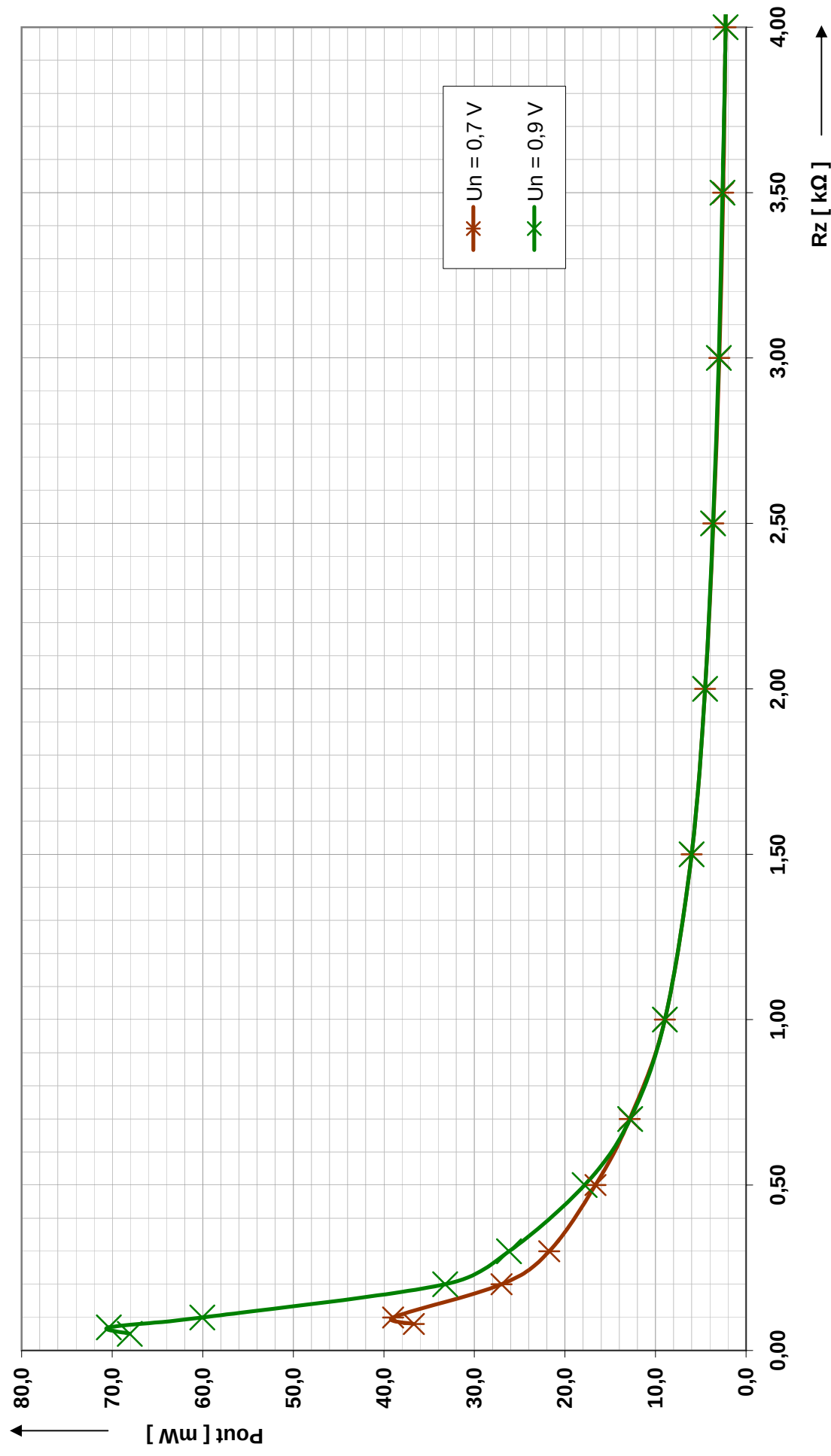
$R_i = 0 \Omega$
 $U_n = 0,9 \text{ V}$

Rz	lin	Uout	Iout	Pout	η
[k Ω]	[mA]	[V]	[mA]	[mW]	[%]
0,05	167,20	1,89	36,01	68,06	45,23
0,07	147,55	2,25	31,27	70,36	52,98
0,10	112,30	2,49	24,11	60,03	59,40
0,20	51,70	2,59	12,83	33,23	71,42
0,30	44,80	2,97	8,81	26,17	64,90
0,50	26,60	2,99	5,96	17,82	74,44
0,70	19,07	3,00	4,27	12,81	74,64
1,00	13,27	3,00	2,99	8,97	75,11
1,50	8,79	3,01	2,00	6,02	76,10
2,00	6,68	3,01	1,50	4,52	75,10
2,50	5,32	3,01	1,21	3,64	76,07
3,00	4,48	3,01	1,00	3,01	74,65
3,50	3,84	3,02	0,86	2,60	75,15
4,00	3,41	3,02	0,75	2,27	73,80
5,00	2,74	3,02	0,60	1,81	73,48
6,00	2,29	3,02	0,50	1,51	73,27
7,00	1,99	3,02	0,43	1,30	72,51
8,00	1,75	3,02	0,38	1,15	72,86
9,00	1,59	3,02	0,34	1,03	71,75
10,00	1,44	3,02	0,30	0,91	69,91

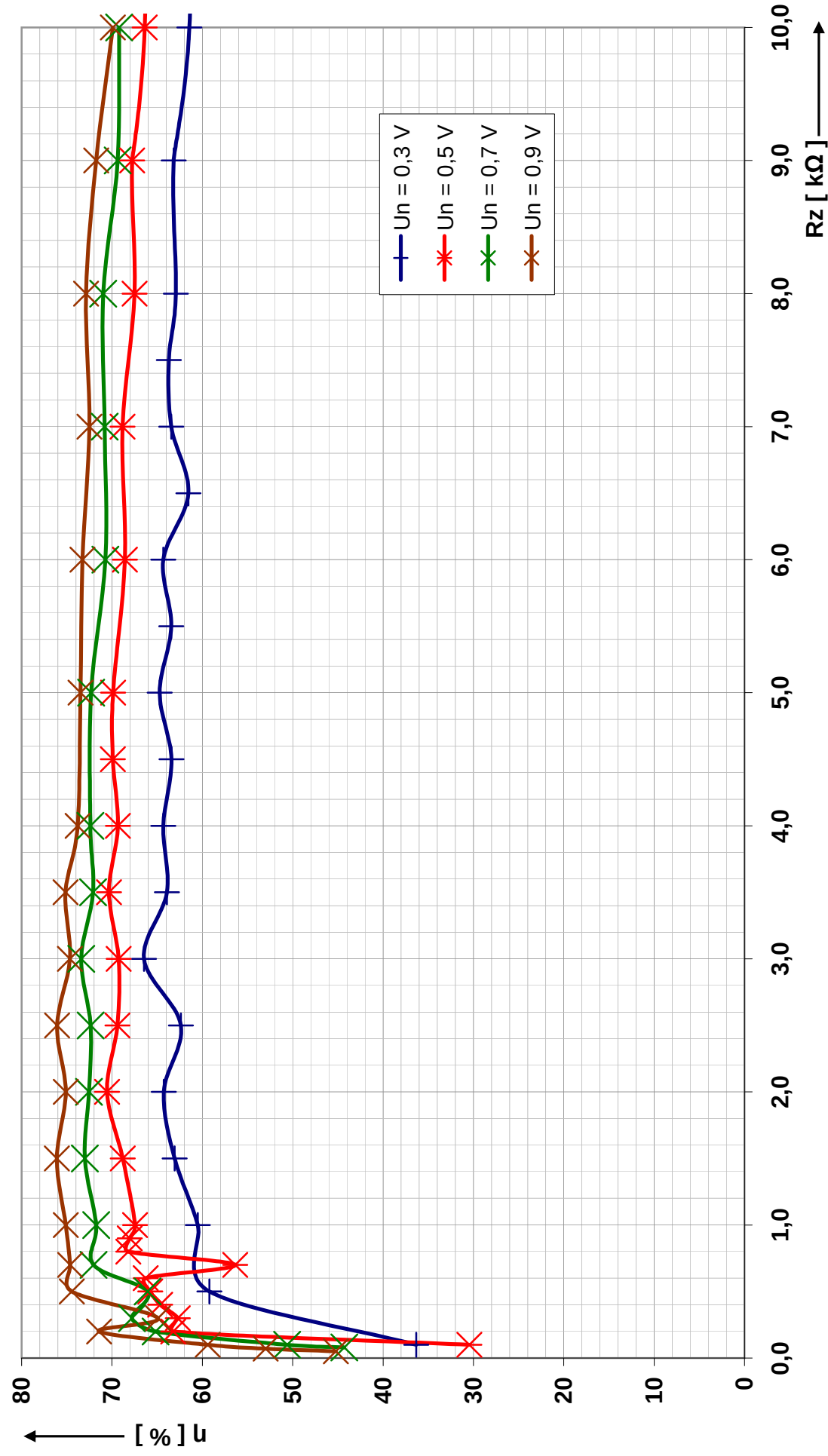
Závislost výkonu DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích U_n a vnitřním odporu zdroje $R_i=0\Omega$



Závislost výkonu DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích U_n a vnitřním odporu zdroje $R_i=0\Omega$



Graf závislosti účinnosti DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích a $R_i = 0 \Omega$



Tabulky závislostí výkonu DC/DC měniče na velikosti zátěže
při různých napájecích napětích U_n a vnitřním odporu zdroje $R_i=10\Omega$:

$R_i = 10 \Omega$
 $U_n = 0,3 \text{ V}$

Rz	lin	Uout	Iout	Pout	η
[k Ω]	[mA]	[V]	[mA]	[mW]	[%]
0,6	22,34	1,45	2,39	3,47	51,71
0,8	19,79	1,67	2,06	3,44	57,95
1,0	19,88	1,87	1,87	3,50	58,63
1,5	19,81	2,35	1,56	3,67	61,69
2,0	19,72	2,74	1,36	3,73	62,99
2,5	19,01	2,99	1,17	3,50	61,34
3,0	14,82	3,01	1,00	3,01	67,70
3,5	13,10	3,01	0,85	2,56	65,10
4,0	11,62	3,01	0,75	2,26	64,76
4,5	10,31	3,01	0,66	1,99	64,23
5,0	9,39	3,02	0,60	1,81	64,32
6,0	7,78	3,02	0,50	1,51	64,70
7,0	6,76	3,02	0,43	1,30	64,03
8,0	5,95	3,02	0,38	1,15	64,29
9,0	5,31	3,02	0,34	1,03	64,46
10,0	4,81	3,02	0,30	0,91	62,79

$R_i = 10 \Omega$
 $U_n = 0,5 \text{ V}$

Rz	lin	Uout	Iout	Pout	η
[k Ω]	[mA]	[V]	[mA]	[mW]	[%]
0,6	34,26	2,63	4,24	11,15	65,10
0,8	33,40	2,96	3,70	10,95	65,58
1,0	30,05	2,97	2,97	8,82	58,71
1,5	16,94	3,01	1,95	5,87	69,30
2,0	12,90	3,01	1,50	4,52	70,00
2,5	10,26	3,01	1,20	3,61	70,41
3,0	8,59	3,01	1,06	3,19	74,29
3,5	7,39	3,01	0,86	2,59	70,06
4,0	6,48	3,01	0,75	2,26	69,68
4,5	5,74	3,01	0,66	1,99	69,22
5,0	5,22	3,02	0,61	1,84	70,58
6,0	4,38	3,02	0,52	1,57	71,71
7,0	3,79	3,02	0,43	1,30	68,53
8,0	3,34	3,02	0,38	1,15	68,72
9,0	2,99	3,02	0,33	1,00	66,66
10,0	2,72	3,02	0,30	0,91	66,62

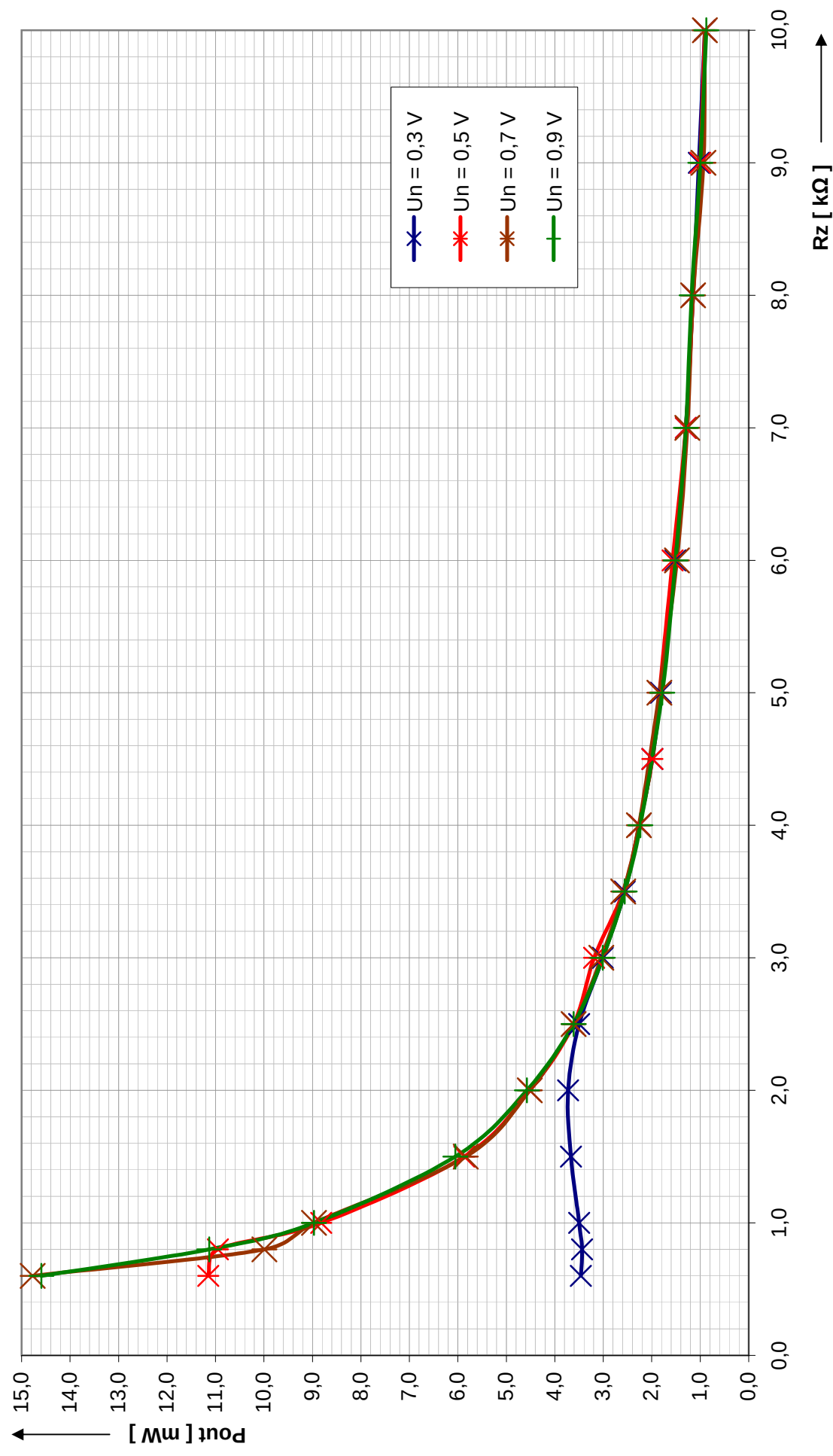
$R_i = 10 \Omega$
 $U_n = 0,7 \text{ V}$

Rz	lin	Uout	Iout	Pout	η
[k Ω]	[mA]	[V]	[mA]	[mW]	[%]
0,6	27,70	2,99	4,94	14,77	76,18
0,8	19,66	3,00	3,33	9,99	72,59
1,0	17,65	3,00	2,99	8,97	72,60
1,5	11,36	3,01	1,94	5,84	73,43
2,0	8,74	3,01	1,50	4,52	73,80
2,5	7,05	3,01	1,20	3,61	73,19
3,0	5,89	3,01	1,01	3,04	73,74
3,5	5,09	3,01	0,86	2,59	72,65
4,0	4,45	3,02	0,75	2,27	72,71
5,0	3,59	3,02	0,61	1,84	73,31
6,0	3,03	3,02	0,49	1,48	69,77
7,0	2,61	3,02	0,42	1,27	69,43
8,0	2,34	3,02	0,38	1,15	70,06
9,0	1,97	3,02	0,31	0,94	67,89
10,0	1,84	3,02	0,30	0,91	70,34

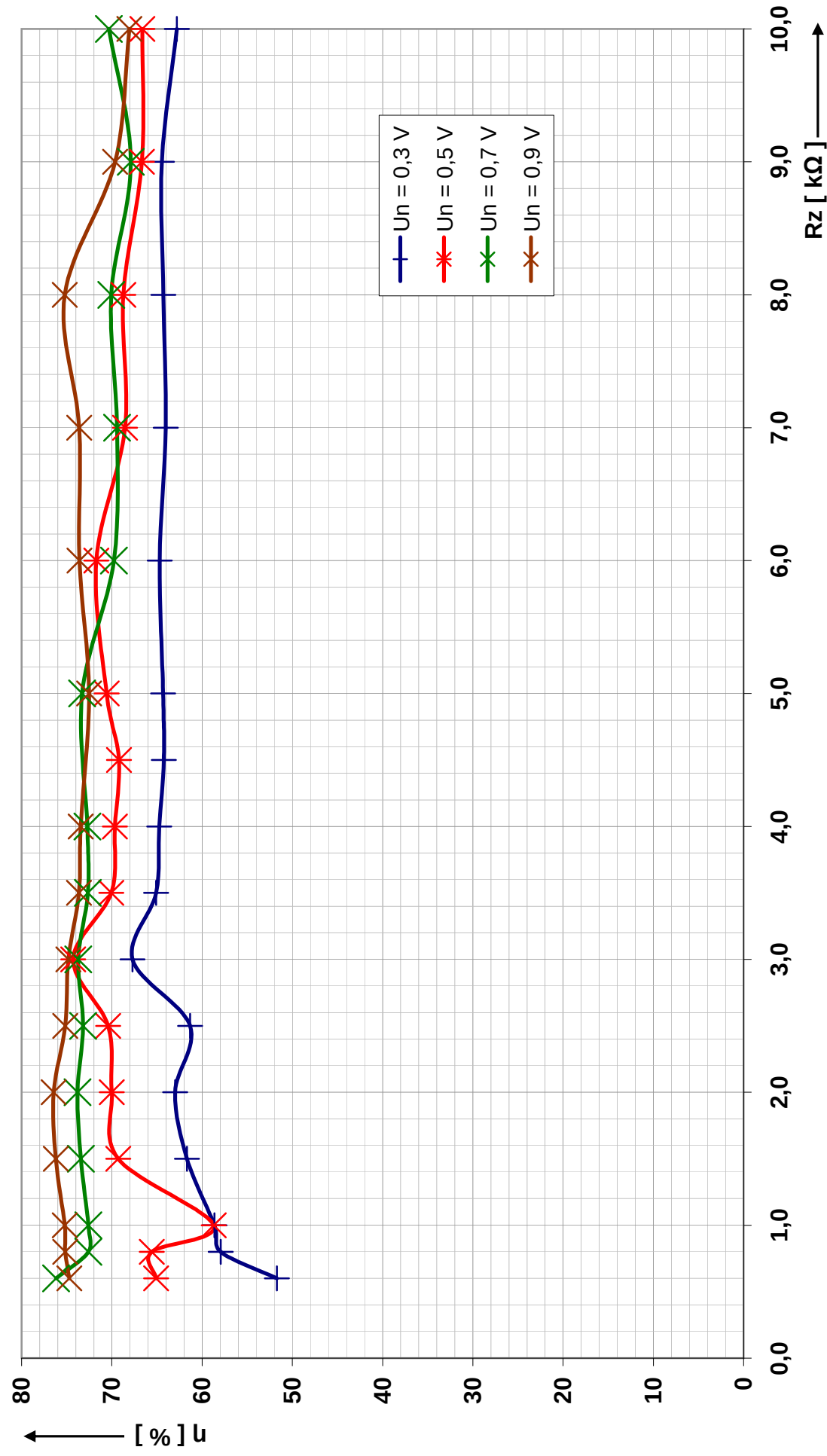
$R_i = 10 \Omega$
 $U_n = 0,9 \text{ V}$

Rz	lin	Uout	Iout	Pout	η
[k Ω]	[mA]	[V]	[mA]	[mW]	[%]
0,6	21,70	2,99	4,88	14,59	74,71
0,8	16,45	3,00	3,71	11,13	75,18
1,0	13,25	3,00	2,99	8,97	75,22
1,5	8,82	3,01	2,01	6,05	76,22
2,0	6,65	3,01	1,52	4,58	76,44
2,5	5,34	3,01	1,20	3,61	75,16
3,0	4,47	3,01	1,00	3,01	74,82
3,5	3,86	3,01	0,85	2,56	73,65
4,0	3,38	3,02	0,74	2,23	73,46
5,0	2,73	3,02	0,59	1,78	72,52
6,0	2,28	3,02	0,50	1,51	73,59
7,0	1,96	3,02	0,43	1,30	73,62
8,0	1,74	3,02	0,39	1,18	75,21
9,0	1,59	3,02	0,33	1,00	69,64
10,0	1,43	3,02	0,29	0,88	68,05

Závislost výkonu DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích U_n a vnitřním odporu zdroje $R_i=10\Omega$



Graf závislosti účinnosti DC/DC měniče na velikosti zátěže při různých napájecích napětích a $R_i = 10\ \Omega$



Tabulky minimálního potřebného napájecího napětí U_n k dlouhodobému chodu DC/DC měniče při různém vnitřním odporu zdroje R_i a zátěži $R_z = 3\text{ k}\Omega$:

$R_i = 20\ \Omega$

$R_z = 3\text{ k}\Omega$

U_{zd} [V]	U_n [V]	I_{in} [mA]	U_{out} [V]	I_{out} [mA]	η [%]	pozn. [-]
0,643	0,26	16,9	2,88	0,96	62,92	VYP
0,666	0,27	17,6	2,99	0,99	62,29	předZAP
0,673	0,46	9,4	3,01	1,00	69,61	ZAP

drží do $U_n = 0,360\text{V}$ pak následuje VYP

$R_i = 30\ \Omega$

$R_z = 3\text{ k}\Omega$

U_{zd} [V]	U_n [V]	I_{in} [mA]	U_{out} [V]	I_{out} [mA]	η [%]	pozn. [-]
0,761	0,24	15,8	2,68	0,89	62,90	VYP
0,846	0,27	17,6	2,99	0,99	62,29	předZAP
0,849	0,63	6,52	3,01	1,00	73,28	ZAP

drží do $U_n = 0,438\text{V}$ pak následuje VYP

$R_i = 50\ \Omega$

$R_z = 3\text{ k}\Omega$

U_{zd} [V]	U_n [V]	I_{in} [mA]	U_{out} [V]	I_{out} [mA]	η [%]	pozn. [-]
0,949	0,21	13,9	2,33	0,78	61,94	VYP
1,193	0,27	17,6	2,99	0,99	62,29	předZAP
1,203	0,99	3,98	3,01	1,00	76,39	ZAP

drží do $U_n = 0,549\text{V}$ pak následuje VYP

$R_i = 70\ \Omega$

$R_z = 3\text{ k}\Omega$

U_{zd} [V]	U_n [V]	I_{in} [mA]	U_{out} [V]	I_{out} [mA]	η [%]	pozn. [-]
1,103	0,19	12,5	2,07	0,69	60,05	VYP
1,544	0,27	17,6	2,99	0,99	62,29	předZAP
1,556	1,35	2,9	3,01	1,00	76,88	ZAP

drží do $U_n = 0,652\text{V}$ pak následuje VYP

Tabulky minimálního potřebného napájecího napětí U_n k dlouhodobému chodu DC/DC měniče při různém vnitřním odporu zdroje R_i a zátěži $R_z = 3\text{ k}\Omega$:

$R_i = 100\ \Omega$

$R_z = 3\text{ k}\Omega$

U_{zd} [V]	U_n [V]	I_{in} [mA]	U_{out} [V]	I_{out} [mA]	η [%]	pozn. [-]
1,282	0,16	10,4	1,67	0,56	56,20	VYP
2,16	0,27	17,6	2,99	0,98	61,66	předZAP
2,18	1,99	1,9	3,01	1,00	79,61	ZAP

$R_i = 200\ \Omega$

$R_z = 3\text{ k}\Omega$

U_{zd} [V]	U_n [V]	I_{in} [mA]	U_{out} [V]	I_{out} [mA]	η [%]	pozn. [-]
1,821	0,52	-	-	-	-	VYP
4,197	0,27	17,6	2,99	0,99	62,29	předZAP
4,226	3,91	1,48	3,68	1,26	80,13	ZAP

$R_i = 300\ \Omega$

$R_z = 3\text{ k}\Omega$

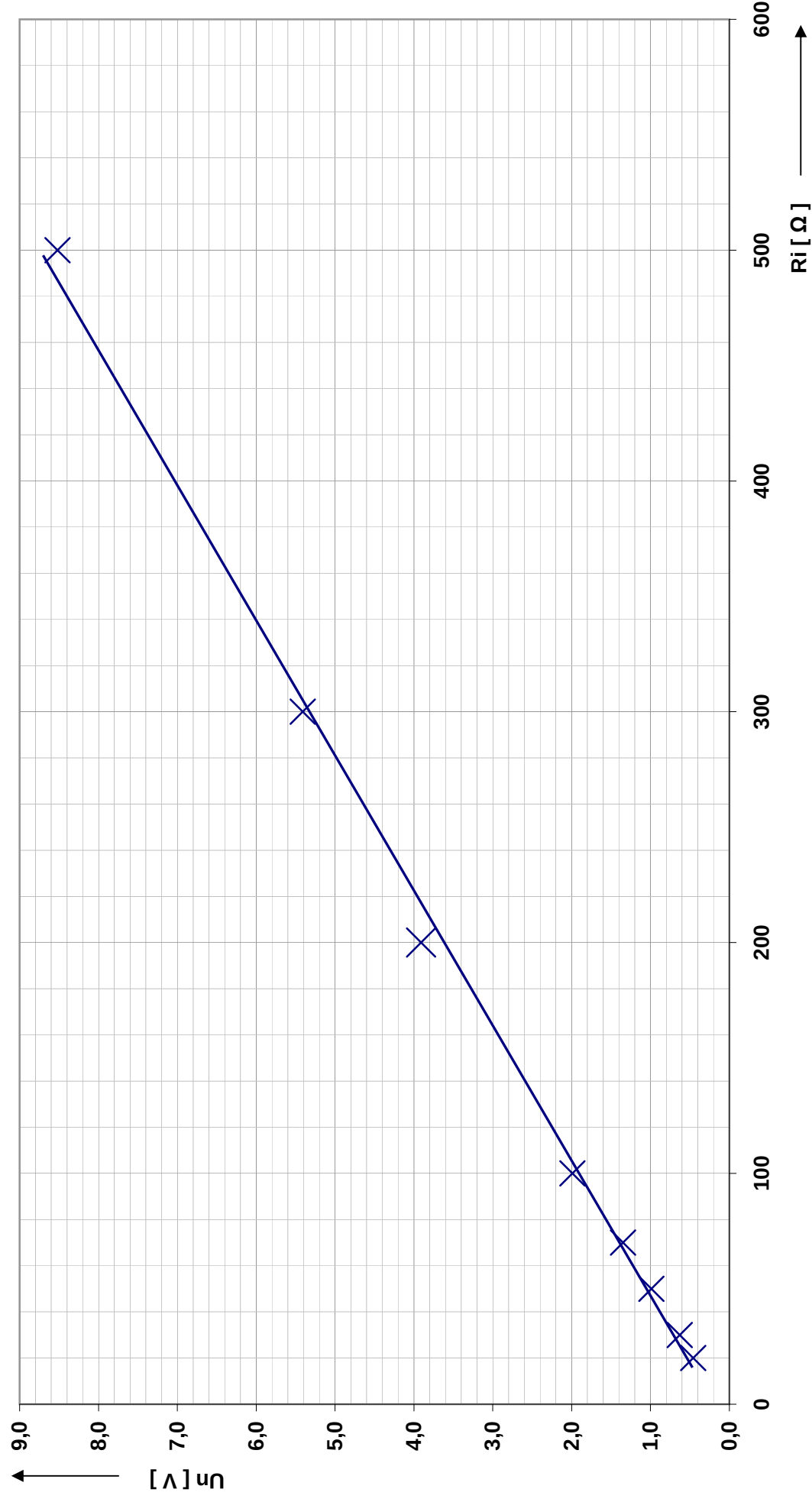
U_{zd} [V]	U_n [V]	I_{in} [mA]	U_{out} [V]	I_{out} [mA]	η [%]	pozn. [-]
2,1	0,56	-	-	-	-	VYP
6,014	0,27	17,6	2,99	0,99	62,29	předZAP
6,083	5,41	2,07	5,18	1,72	79,56	ZAP

$R_i = 500\ \Omega$

$R_z = 3\text{ k}\Omega$

U_{zd} [V]	U_n [V]	I_{in} [mA]	U_{out} [V]	I_{out} [mA]	η [%]	pozn. [-]
2,6	0,18	-	-	-	-	VYP
9,4	0,26	17,5	2,98	0,98	64,18	předZAP
9,6	8,52	3,03	7,6	2,36	69,48	ZAP

Graf minimálního potřebného napájecího napětí U_n k dlouhodobému chodu DC/DC měniče při různém vnitřním odporu zdroje R_i a zátěži $R_z = 3\text{ k}\Omega$:



Příloha č. 2:

Tabulky závislostí výkonu DC/DC měniče na velikosti zátěže pro napájecí napětí $U_n = 0,3\text{ V}$ a různé vnitřní impedance zdroje

$U_n = 0,3\text{V}$

$R_i = 30\Omega$

Rz	Uzd	I _{in}	I _{out}	I _{outmax}	U _{out}	časU _{out}	U _{outmax}	čU _{outm}	P _{out}	P _{outmax}
[Ω]	[V]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[s]	[V]	[s]	[μW]	[μW]
10	0,369	2,30	0,40	2,32	0,010	0,3	0,080	6,2	4,0	185,6
20	0,369	2,10	1,20	2,05	0,020	0,3	0,092	4,4	24,0	188,6
30	0,367	1,84	1,10	1,82	0,020	0,3	0,092	4,0	22,0	167,4
50	0,355	1,44	0,70	1,42	0,025	0,3	0,100	4,1	17,5	142,0
70	0,355	1,24	0,70	1,23	0,030	0,3	0,120	3,4	21,0	147,6
100	0,337	0,93	0,41	1,01	0,100	4,2	0,150	0,2	41,0	151,5
300	0,318	0,42	0,39	0,72	0,130	4,5	0,300	0,3	50,7	216,0
500	0,315	0,28	0,25	0,64	0,140	4,4	0,380	0,2	35,0	243,2
700	0,314	0,22	0,21	0,62	0,150	4,0	0,470	0,2	31,5	291,4
1000	0,311	0,17	0,15	0,56	0,160	4,2	0,550	0,2	24,0	308,0
2000	0,308	0,11	0,08	0,36	0,170	4,5	0,816	0,2	13,6	293,8
3000	0,304	0,07	0,06	0,31	0,180	4,8	0,900	0,2	10,8	279,0
4000	0,304	0,06	0,04	0,27	0,180	4,9	1,000	0,2	7,2	270,0
5000	0,304	0,04	0,04	0,22	0,190	5,0	1,200	0,2	7,6	264,0
7000	0,304	0,04	0,03	0,18	0,200	5,2	1,300	0,9	6,0	234,0
10000	0,304	6,40	0,18	-	1,700	stabilně	-	-	306,0	

$U_n = 0,3\text{V}$

$R_i = 50\Omega$

Rz	Uzd	I _{in}	I _{out}	I _{outmax}	U _{out}	časU _{out}	U _{outmax}	čU _{outm}	P _{out}	P _{outmax}
[Ω]	[V]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[s]	[V]	[s]	[μW]	[μW]
100	0,339	0,79	0,19	0,77	0,020	0,2	0,100	6,1	3,8	77,0
300	0,328	0,42	0,11	0,29	0,130	4,4	0,180	0,2	14,3	52,2
500	0,321	0,29	0,06	0,27	0,140	4,4	0,240	0,2	8,4	64,8
700	0,312	0,22	0,07	0,21	0,145	5,0	0,280	0,2	10,2	58,8
1000	0,312	0,17	0,08	0,15	0,160	4,6	0,320	0,2	12,8	48,0
2000	0,312	0,11	0,08	0,21	0,175	4,4	0,500	0,2	14,0	105,0
3000	0,310	0,08	0,06	0,16	0,180	4,4	0,610	0,2	10,8	97,6
5000	0,310	0,06	0,04	0,14	0,200	4,4	0,760	0,2	8,0	106,4
7000	0,304	0,05	0,03	0,12	0,200	5,0	0,840	0,2	6,0	100,8
10000	0,304	0,04	0,02	0,09	0,210	4,8	1,000	0,2	4,2	90,0
20000	0,304	4,30	0,07		1,640	stabilně			114,8	

$U_n = 0,3\text{V}$

$R_i = 70\Omega$

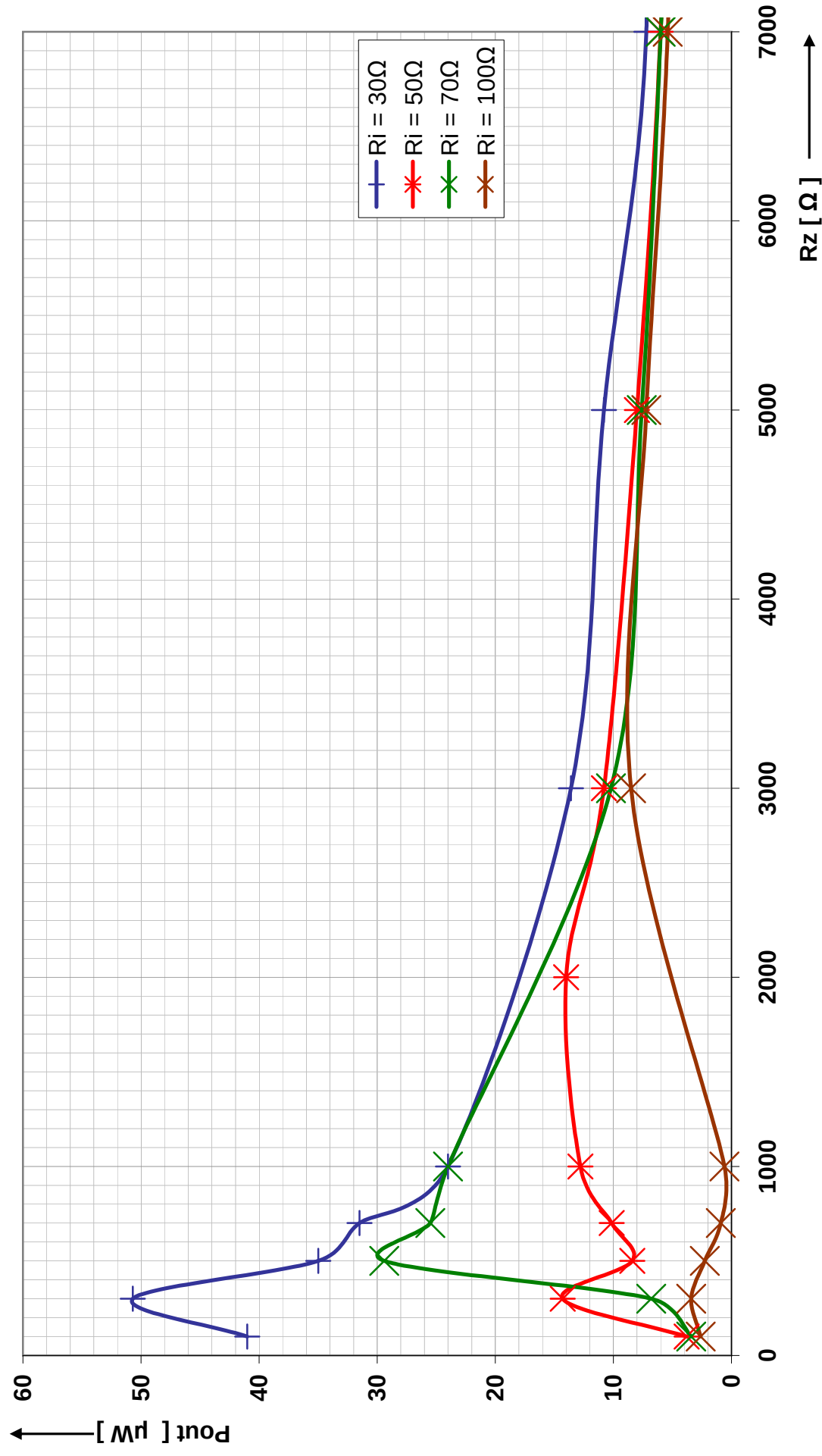
Rz	Uzd	I _{in}	I _{out}	I _{outmax}	U _{out}	časU _{out}	U _{outmax}	čU _{outm}	P _{out}	P _{outmax}
[Ω]	[V]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[s]	[V]	[s]	[μW]	[μW]
100	0,359	0,86	0,34	0,84	0,010	0,3	0,100	5,6	3,4	84,0
300	0,328	0,40	0,34	0,38	0,020	0,3	0,125	4,6	6,8	47,5
500	0,325	0,29	0,21	0,27	0,140	4,6	0,180	0,2	29,4	48,6
700	0,319	0,23	0,17	0,20	0,150	4,6	0,210	0,2	25,5	42,0
1000	0,319	0,18	0,15	0,15	0,160	4,8	0,260	0,2	24,0	39,0
3000	0,306	0,08	0,06	0,12	0,170	4,4	0,460	0,2	10,2	55,2
5000	0,306	0,06	0,04	0,11	0,190	4,8	0,600	0,2	7,6	66,0
7000	0,306	0,05	0,03	0,09	0,200	5,0	0,650	0,2	6,0	58,5
10000	0,306	0,04	0,02	0,06	0,215	4,6	0,740	0,3	4,3	44,4
30000	0,306	0,03	0,01	0,03	0,225	4,6	0,920	0,5	2,3	27,6
50000	0,306	3,34	0,04		1,740	stabilně			69,6	

Un = 0,3V

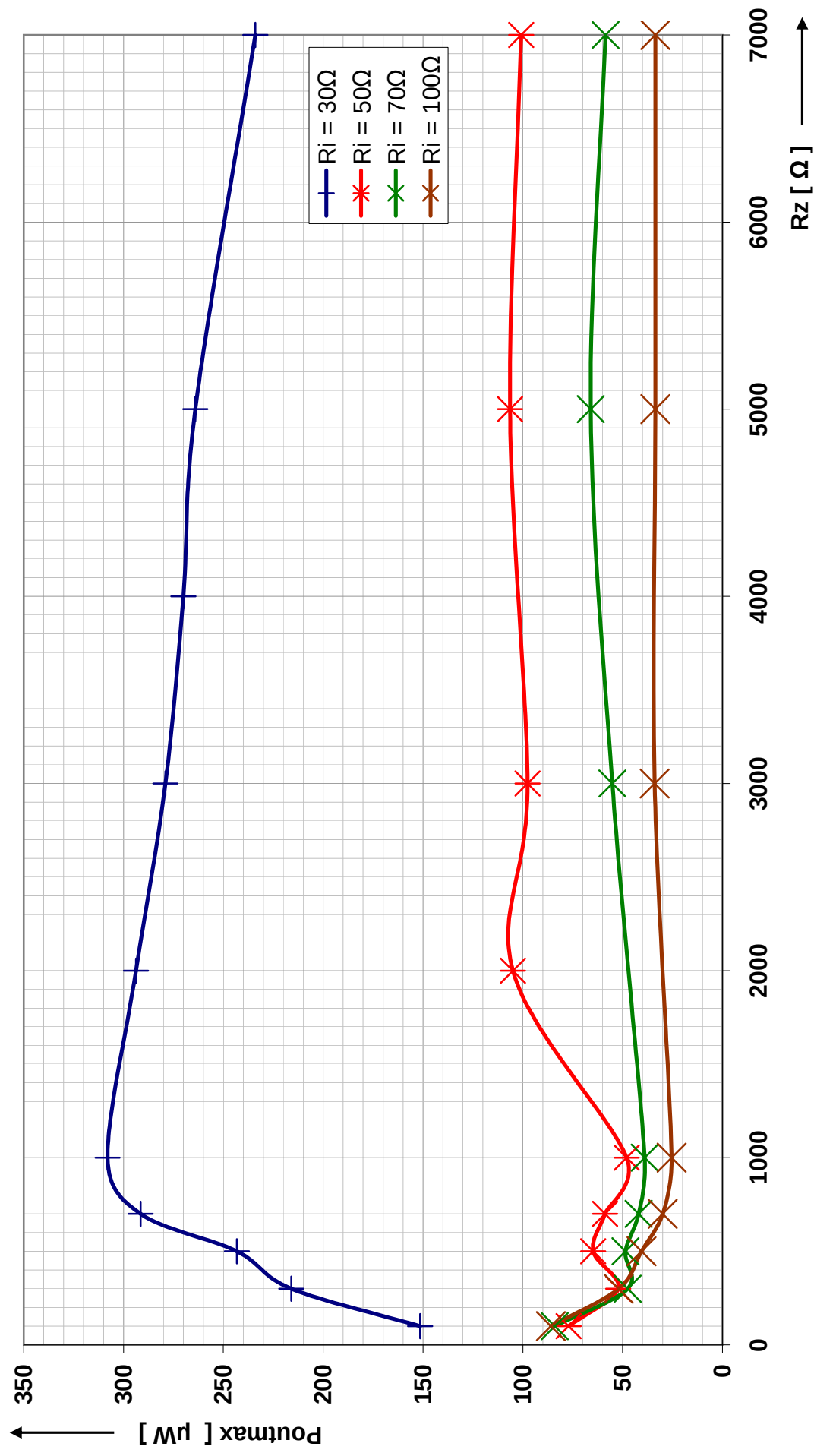
Ri = 100Ω

Rz	Uzd	Iin	Iout	Ioutmax	Uout	časUout	Uoutmax	čUoutm	Pout	Poutmax
[Ω]	[V]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[s]	[V]	[s]	[μW]	[μW]
100	0,387	0,88	0,260	0,860	0,010	0,3	0,100	5,7	2,6	86,0
300	0,350	0,43	0,170	0,400	0,020	0,3	0,130	4,3	3,4	52,0
500	0,335	0,29	0,090	0,270	0,025	0,3	0,150	4,4	2,3	40,5
700	0,324	0,22	0,030	0,200	0,030	0,3	0,150	5,2	0,9	30,0
1000	0,321	0,17	0,020	0,150	0,030	0,3	0,170	4,7	0,6	25,5
3000	0,309	0,08	0,050	0,100	0,170	4,6	0,340	0,2	8,5	34,0
5000	0,304	0,06	0,040	0,080	0,180	5,2	0,420	0,2	7,2	33,6
7000	0,304	0,05	0,027	0,070	0,200	5,2	0,480	0,2	5,4	33,6
10000	0,303	0,04	0,020	0,060	0,205	5,2	0,540	0,2	4,1	32,4
30000	0,303	0,03	0,007	0,020	0,210	4,6	0,700	0,3	1,5	14,0
50000	0,303	0,03	0,005	0,016	0,240	4,8	0,720	0,5	1,2	11,5

Graf závislosti výkonu P_{out} DC/DC měniče na velikosti zátěže R_z při napájecím napětí $U_n = 0,3V$ a při různých vnitřních impedancích zdroje R_i



Graf závislosti maximálního výkonu Poutmax DC/DC měniče na velikosti zátěže R_z při $U_n = 0,3V$ a různých vnitřních impedancích zdroje R_i



Tabulky závislostí výkonu DC/DC měniče na velikosti zátěže
pro napájecí napětí $U_n = 0,5\text{ V}$ a různé vnitřní impedance zdroje

$U_n = 0,5\text{ V}$

$R_i = 30\Omega$

Rz	Uzd	lin	Iout	Ioutmax	Uout	časUout	Uoutmax	čUoutm	Pout	Poutmax
[Ω]	[V]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[s]	[V]	[s]	[μW]	[μW]
100	0,600	4,00	1,00	2,50	0,170	0,24	0,250	0,55	170,0	625,0
300	0,557	3,00	0,40	1,60	0,280	0,24	0,530	0,25	112,0	848,0
500	0,534	2,40	0,34	1,30	0,300	0,24	0,670	0,25	102,0	871,0
700	0,520	1,80	0,30	1,10	0,310	0,30	0,780	0,25	93,0	858,0
1000	0,520	1,60	0,20	0,90	0,315	0,30	0,930	0,25	63,0	837,0
3000	0,52	10,6	0,57		1,74	stabilně			991,8	

$U_n = 0,5\text{ V}$

$R_i = 50\Omega$

Rz	Uzd	lin	Iout	Ioutmax	Uout	časUout	Uoutmax	čUoutm	Pout	Poutmax
[Ω]	[V]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[s]	[V]	[s]	[μW]	[μW]
100	0,640	2,20	0,60	2,30	0,120	0,25	0,260	0,25	72,0	598,0
300	0,574	1,40	0,40	1,16	0,150	0,25	0,360	0,25	60,0	417,6
500	0,550	1,35	0,30	0,91	0,180	0,25	0,450	0,25	54,0	409,5
700	0,535	1,20	0,25	0,78	0,190	0,25	0,540	0,25	47,5	421,2
1000	0,532	0,80	0,15	0,65	0,220	0,25	0,650	0,25	33,0	422,5
3000	0,529	0,70	0,08	0,39	0,310	0,31	1,140	0,20	24,8	444,6
5000	0,529	0,60	0,06	0,27	0,390	0,25	1,300	1,50	23,4	351,0
7000	0,517	7,50	0,25		1,840				460,0	

$U_n = 0,5\text{ V}$

$R_i = 70\Omega$

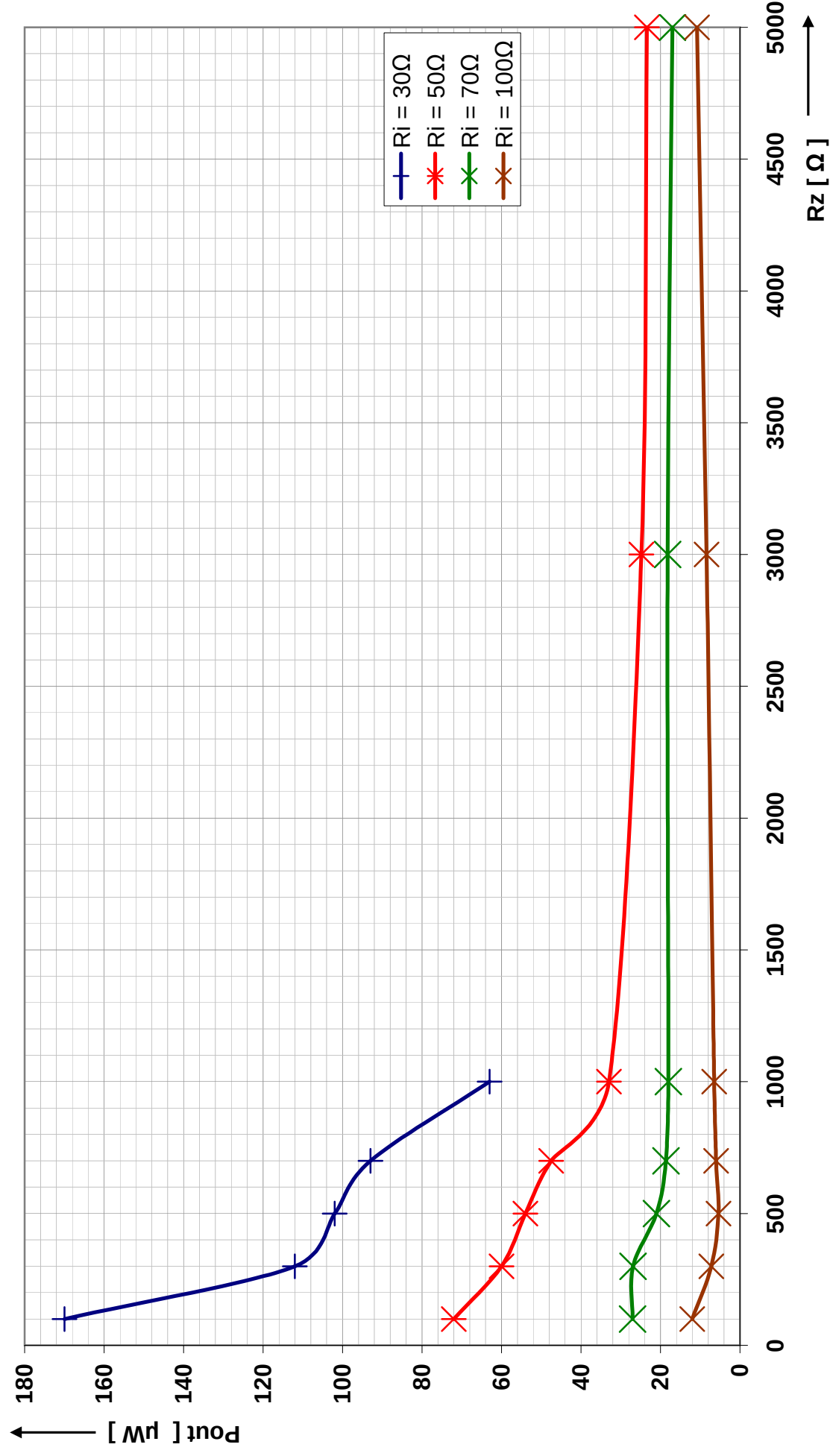
Rz	Uzd	lin	Iout	Ioutmax	Uout	časUout	Uoutmax	čUoutm	Pout	Poutmax
[Ω]	[V]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[s]	[V]	[s]	[μW]	[μW]
100	0,670	2,50	0,30	2,20	0,090	0,25	0,250	0,25	27,0	550,0
300	0,596	1,96	0,21	0,97	0,128	0,25	0,270	0,50	26,9	261,9
500	0,570	1,90	0,15	0,72	0,140	0,25	0,350	0,25	21,0	252,0
700	0,554	1,80	0,12	0,59	0,155	0,25	0,430	0,25	18,6	253,7
1000	0,547	0,90	0,10	0,50	0,180	0,25	0,510	0,25	18,0	255,0
3000	0,530	0,60	0,07	0,29	0,260	0,25	0,858	0,20	18,2	248,8
5000	0,525	0,34	0,05	0,22	0,340	0,25	1,120	0,20	17,0	246,4
7000	0,525	0,30	0,04	0,18	0,390	0,25	1,240	0,15	15,6	223,2
10000	0,525	5,90	0,16		1,640	stabilně			262,4	

$U_n = 0,5\text{ V}$

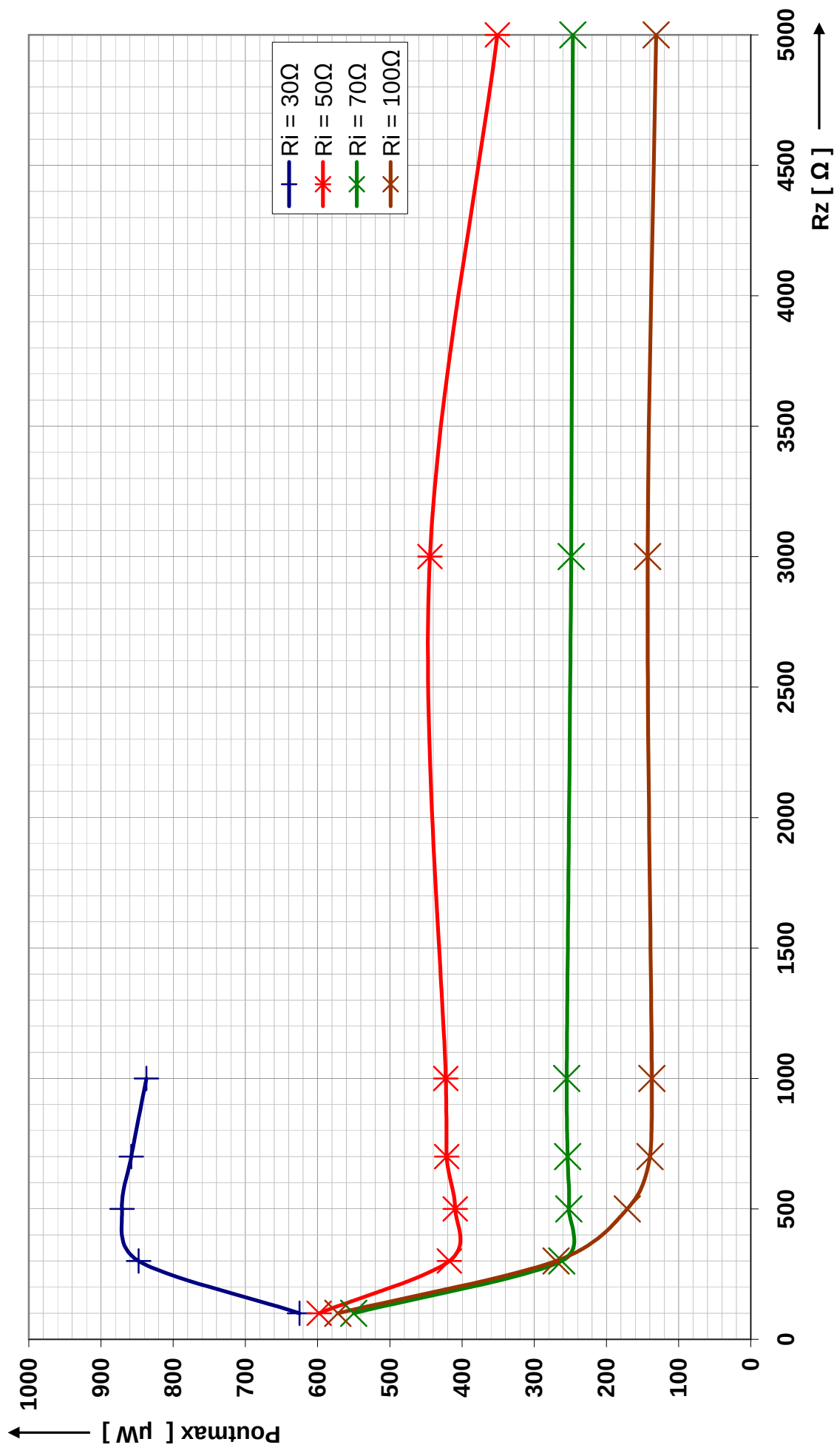
$R_i = 100\Omega$

Rz	Uzd	lin	Iout	Ioutmax	Uout	časUout	Uoutmax	čUoutm	Pout	Poutmax
[Ω]	[V]	[mA]	[mA]	[mA]	[V]	[s]	[V]	[s]	[μW]	[μW]
100	0,771	2,60	0,20	2,20	0,060	0,25	0,260	0,25	12,0	572,0
300	0,627	1,30	0,09	0,93	0,080	0,25	0,290	0,25	7,2	269,7
500	0,582	1,90	0,06	0,57	0,090	0,25	0,300	0,25	5,4	171,0
700	0,570	0,80	0,06	0,45	0,100	0,25	0,310	0,47	6,0	139,5
1000	0,555	0,60	0,05	0,37	0,130	0,25	0,370	0,25	6,5	136,9
3000	0,540	0,40	0,04	0,22	0,210	0,25	0,650	0,20	8,4	143,0
5000	0,535	0,30	0,04	0,16	0,270	0,25	0,820	0,20	10,8	131,2
7000	0,535	0,30	0,04	0,11	0,320	0,25	0,920	0,20	12,8	101,2
10000	0,535	0,30	0,03	0,10	0,340	0,25	1,060	0,18	10,2	106,0
30000	0,535	4,50	0,07		2,000	stabilně			132,0	

Graf závislosti výkonu Pout DC/DC měniče na velikosti zátěže Rz při napájecím napětí Un = 0,5V a při různých vnitřních impedancích zdroje Ri



Graf závislosti maximálního výkonu Poutmax DC/DC měniče na velikosti zátěže R_z při $U_n = 0,5V$ a různých vnitřních impedancích zdroje R_i

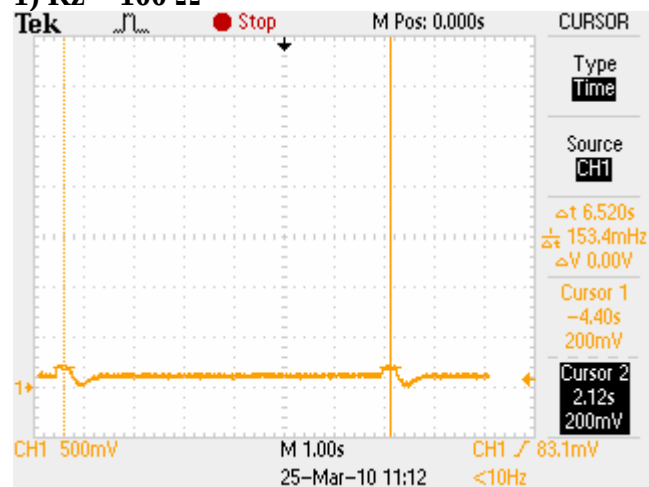


Průběhy výstupního napětí DC/DC měniče na čase při:

$U_n = 0,3 \text{ V}$, $R_i = 30 \Omega$

(měřítko napětí: 500 mV/dílek, měřítko času: 1 s/dílek)

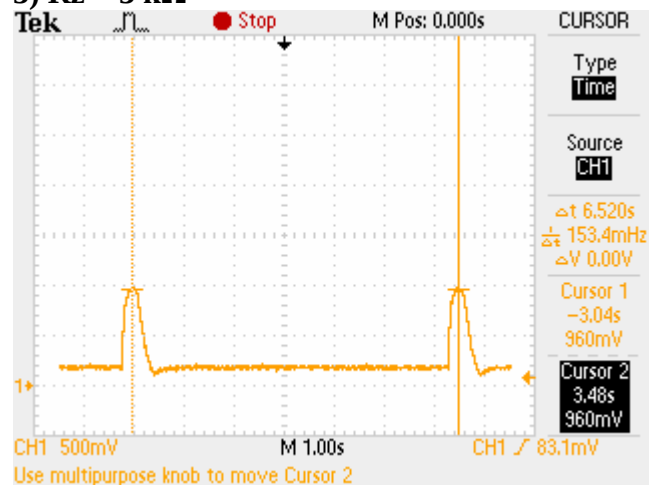
1) $R_z = 100 \Omega$



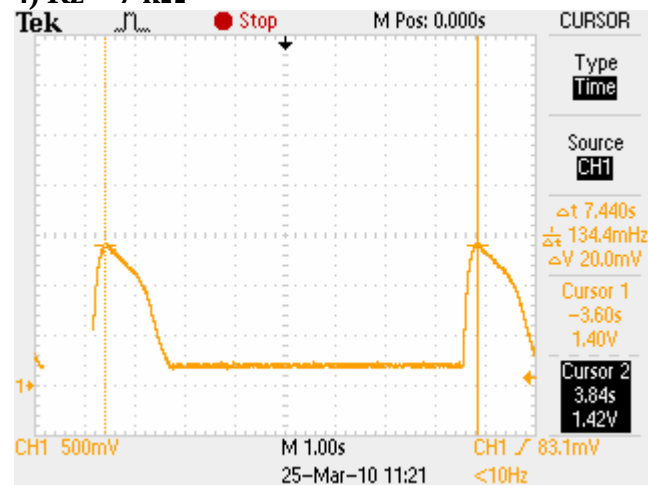
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



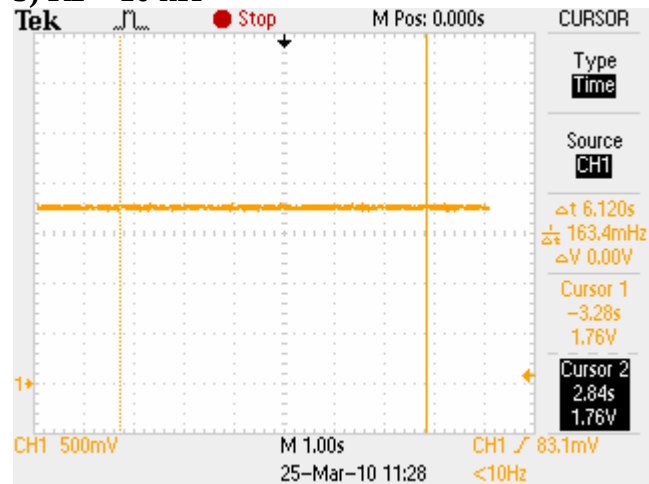
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



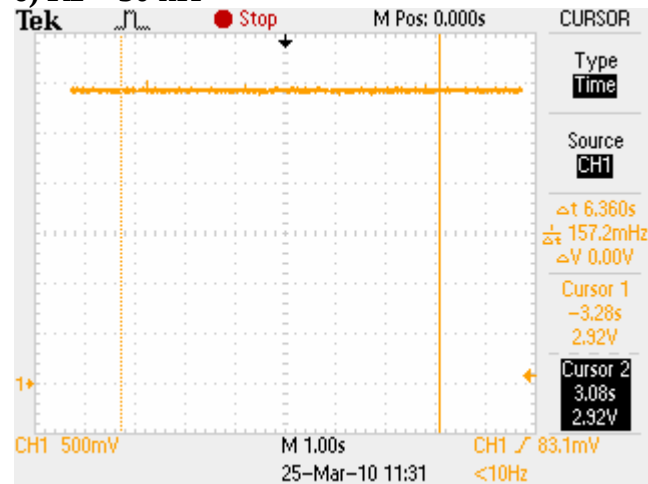
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

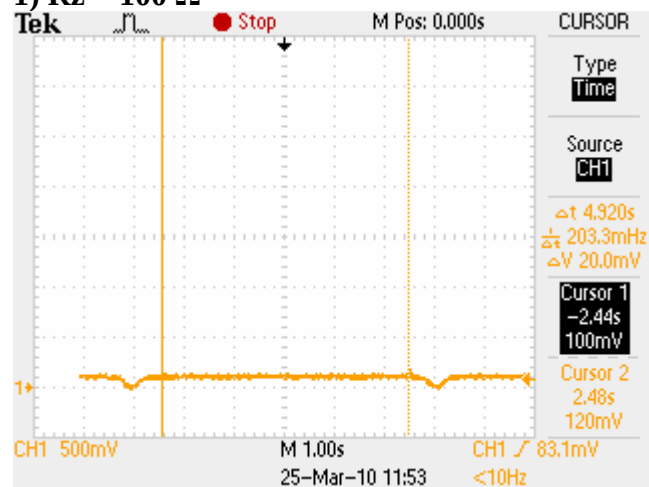


Průběhy výstupního napětí DC/DC měniče na čase při:

$U_n = 0,3 \text{ V}$, $R_i = 50 \Omega$

(měřítko napětí: 500 mV/dílek, měřítko času: 1 s/dílek)

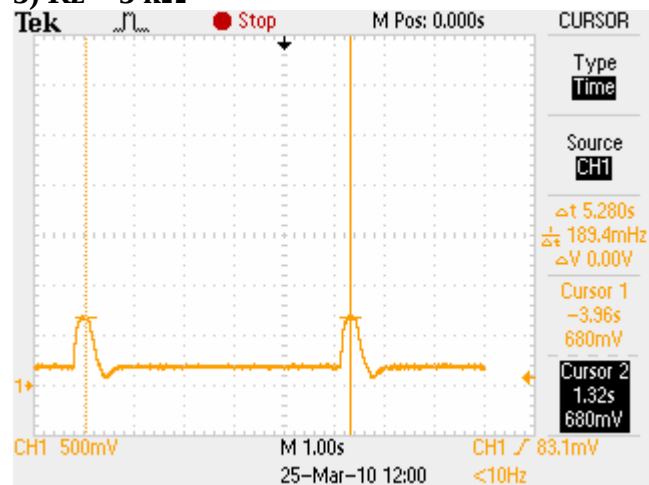
1) $R_z = 100 \Omega$



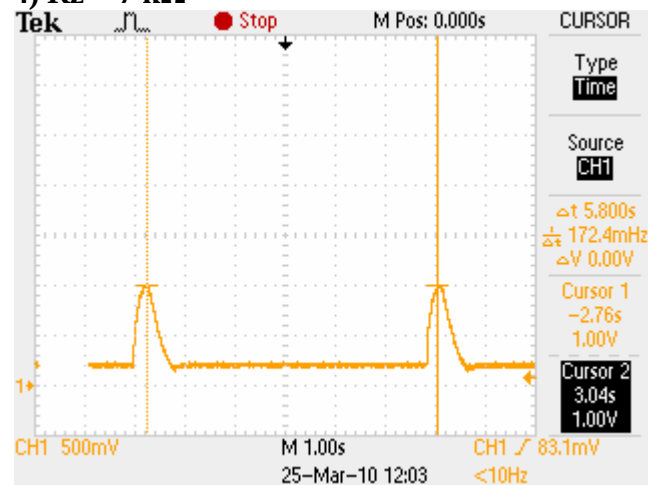
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



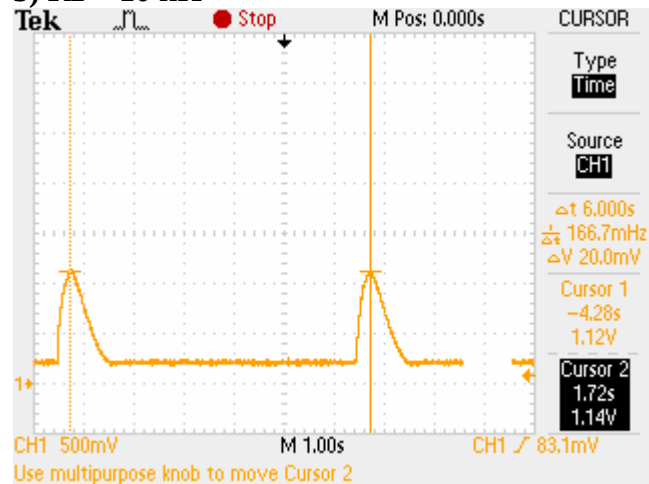
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



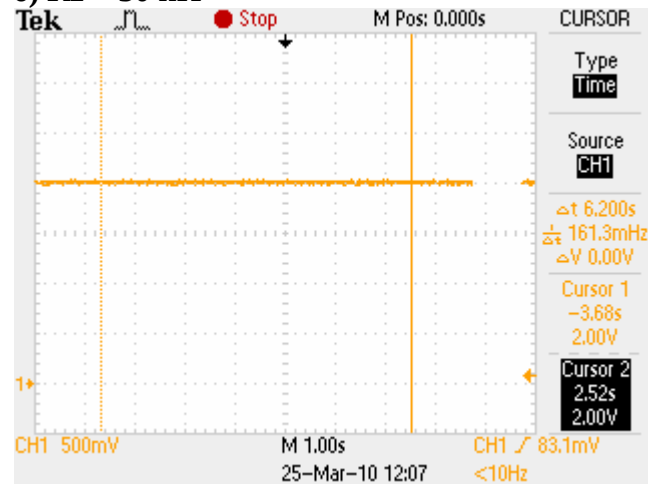
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$



Průběhy výstupního napětí DC/DC měniče na čase při:

$U_n = 0,3 \text{ V}$, $R_i = 70 \Omega$

(měřítko napětí: 500 mV/dílek, měřítko času: 1 s/dílek)

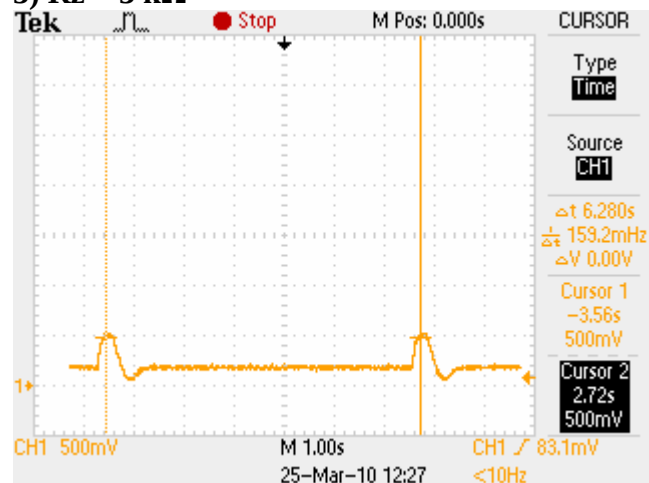
1) $R_z = 100 \Omega$



2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



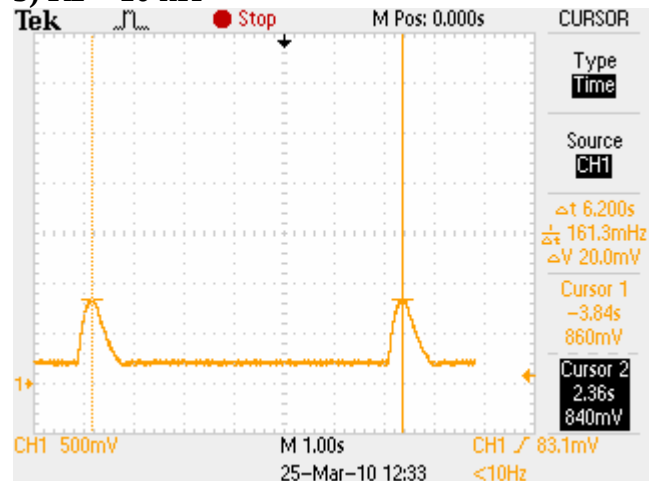
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



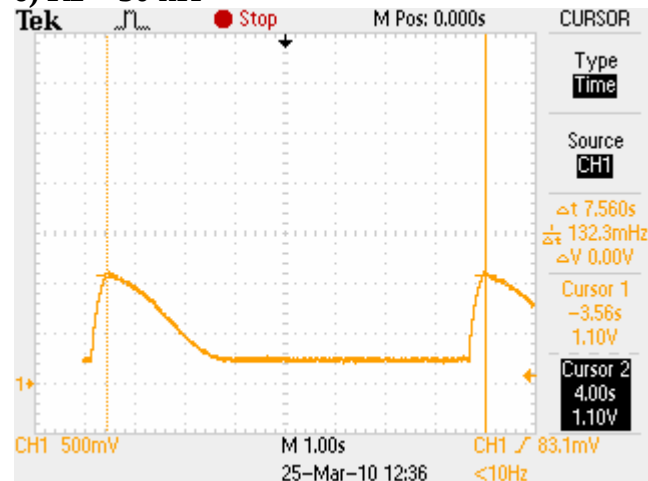
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

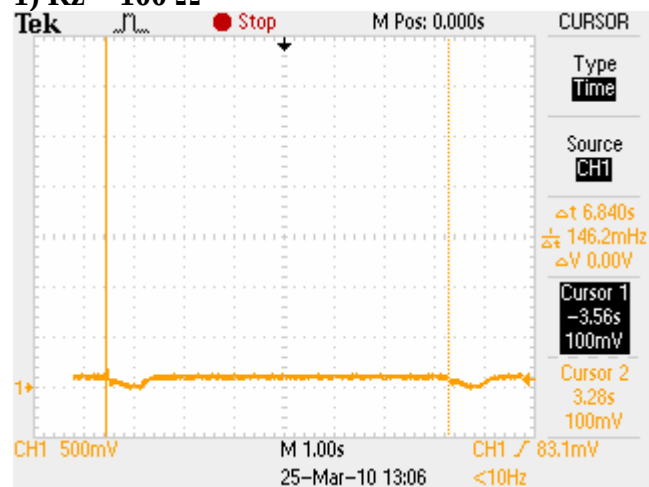


Průběhy výstupního napětí DC/DC měniče na čase při:

$U_n = 0,3 \text{ V}$, $R_i = 100 \Omega$

(měřítko napětí: 500 mV/dílek, měřítko času: 1 s/dílek)

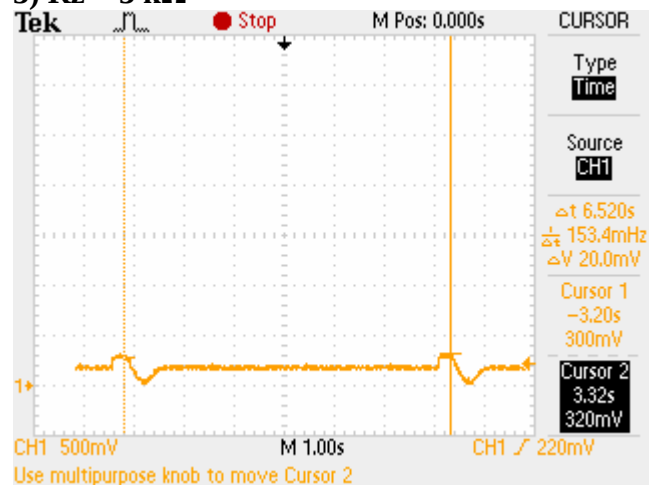
1) $R_z = 100 \Omega$



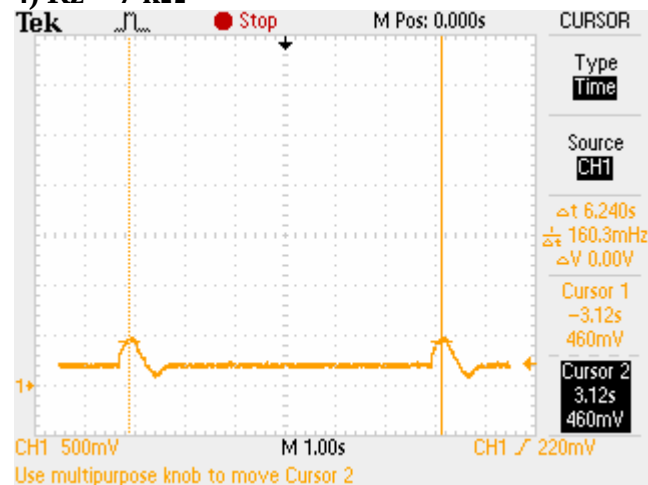
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



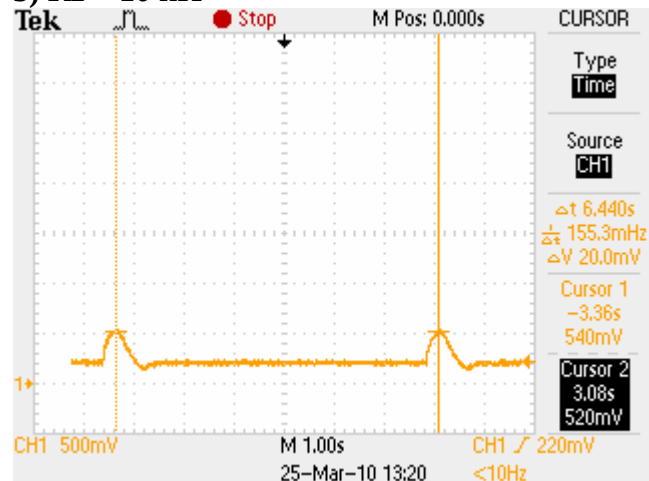
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



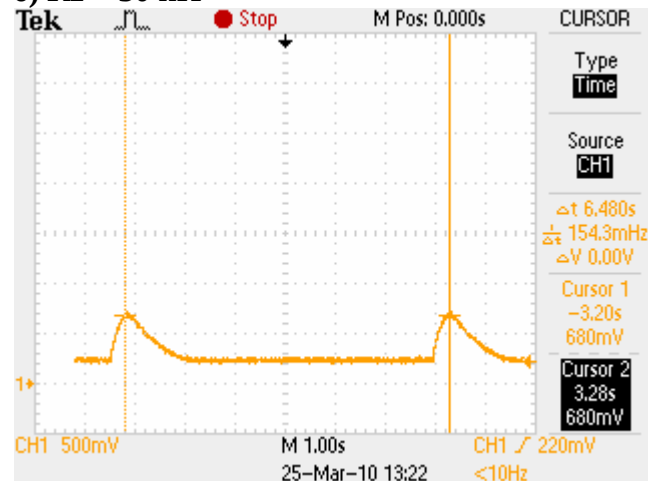
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

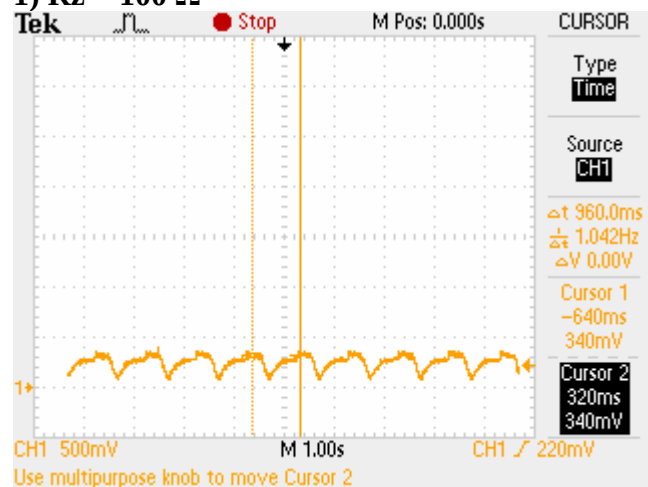


Průběhy výstupního napětí DC/DC měniče na čase při:

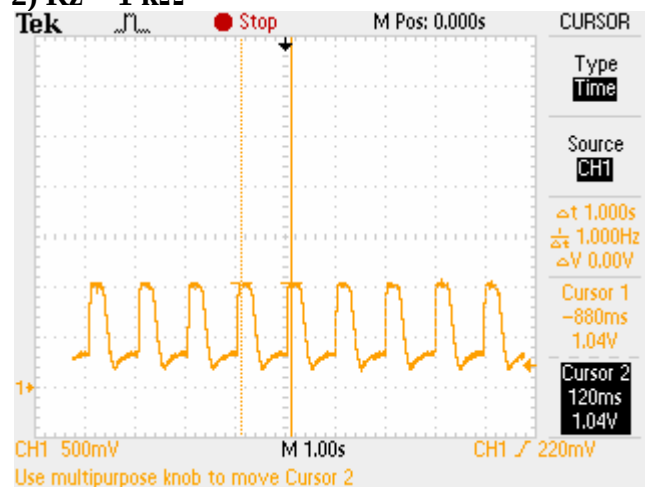
$U_n = 0,5 \text{ V}$, $R_i = 30 \Omega$

(měřítka napětí: 500 mV/dílek, měřítka času: 1 s/dílek)

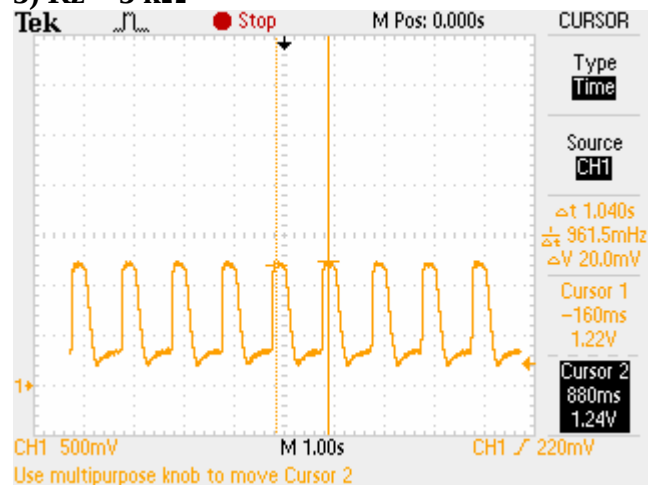
1) $R_z = 100 \Omega$



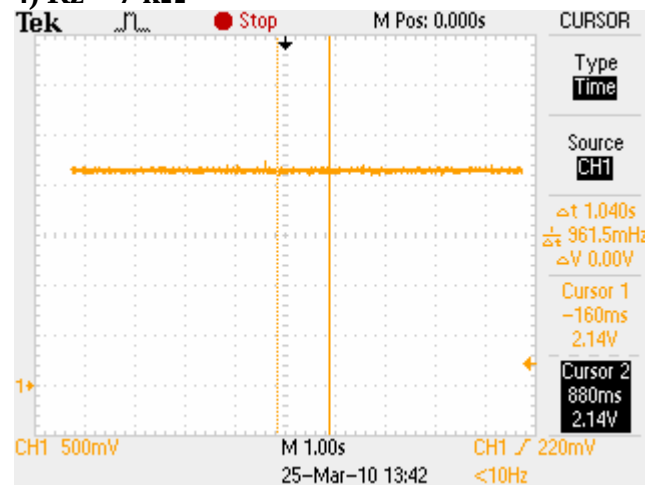
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



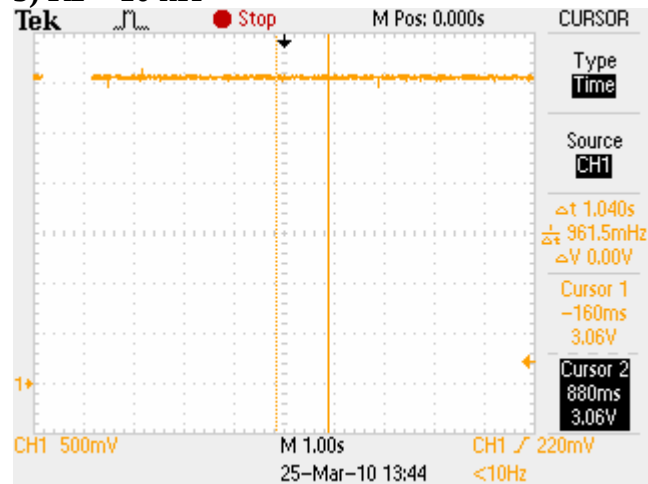
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



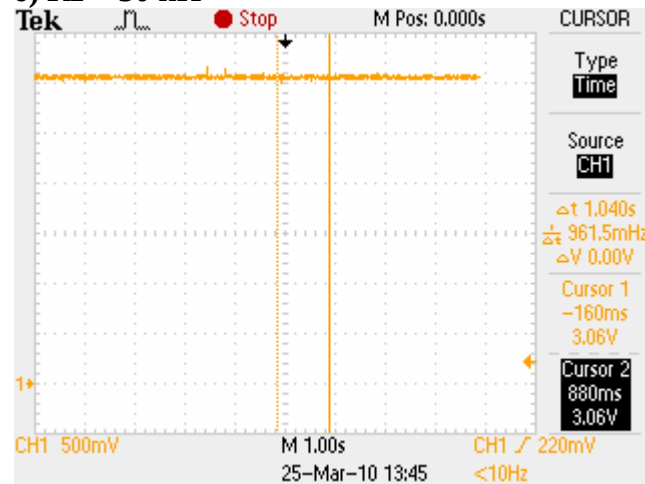
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

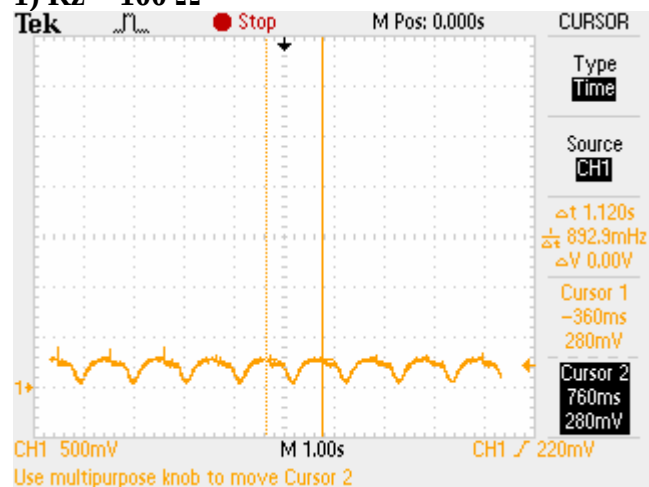


Průběhy výstupního napětí DC/DC měniče na čase při:

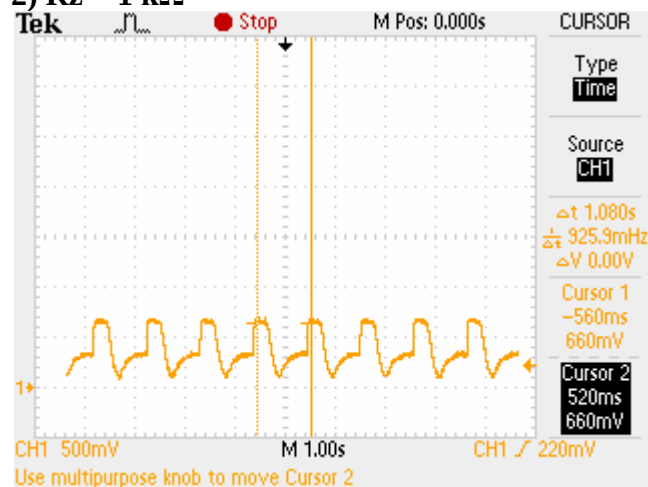
$U_n = 0,5 \text{ V}$, $R_i = 50 \Omega$

(měřítka napětí: 500 mV/dílek, měřítka času: 1 s/dílek)

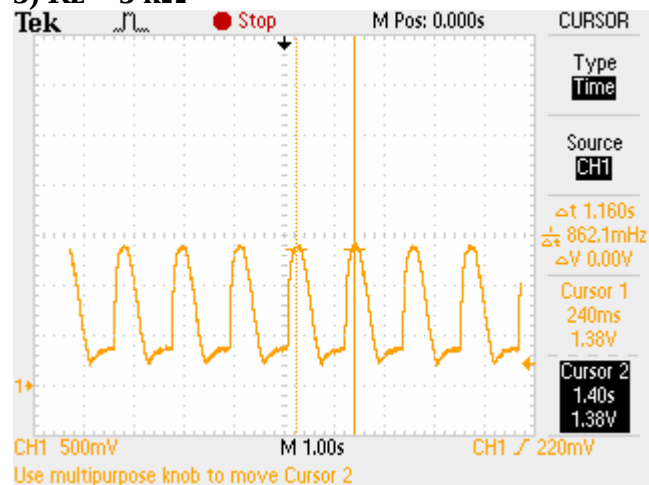
1) $R_z = 100 \Omega$



2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



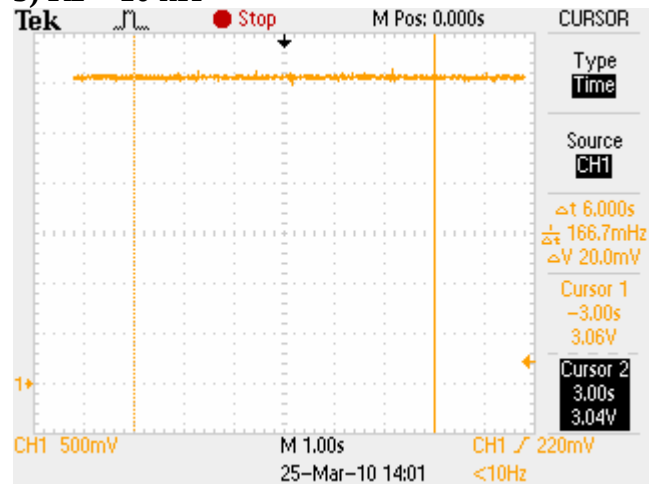
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



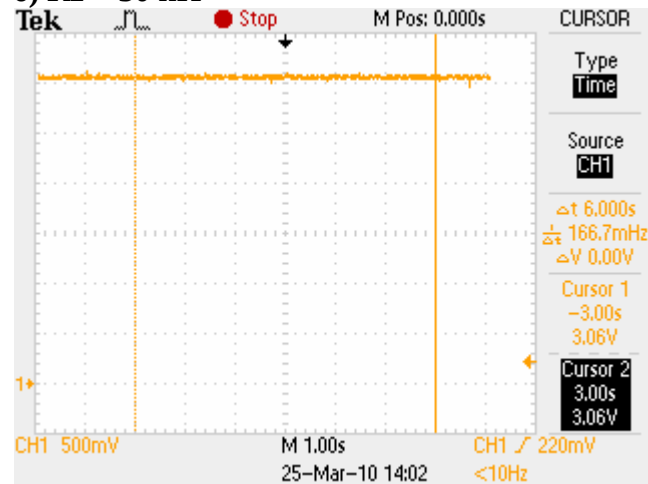
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

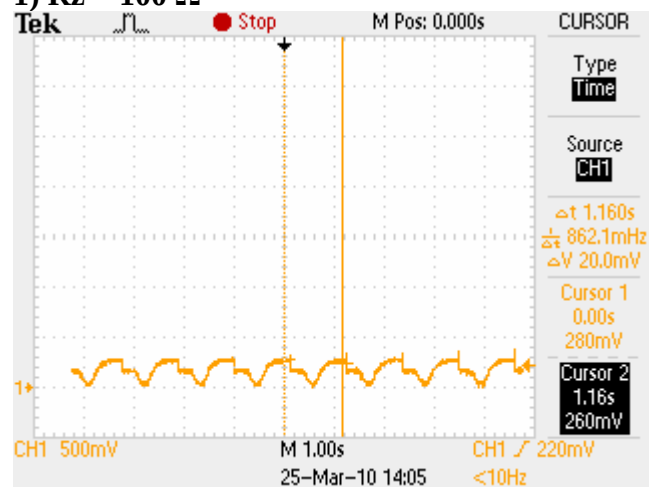


Průběhy výstupního napětí DC/DC měniče na čase při:

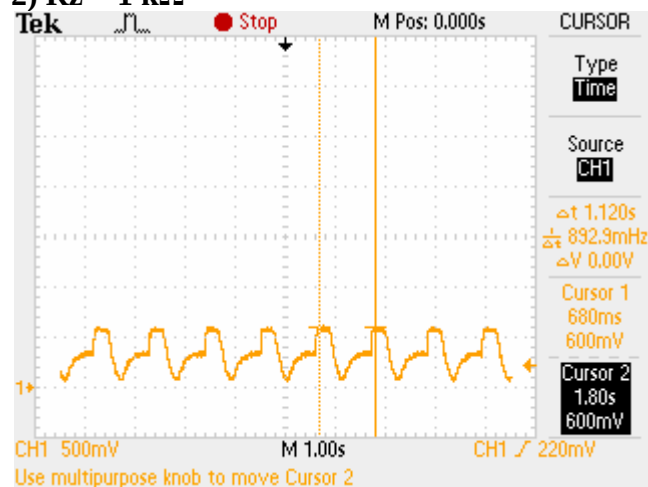
$U_n = 0,5 \text{ V}$, $R_i = 70 \Omega$

(měřítko napětí: 500 mV/dílek, měřítko času: 1 s/dílek)

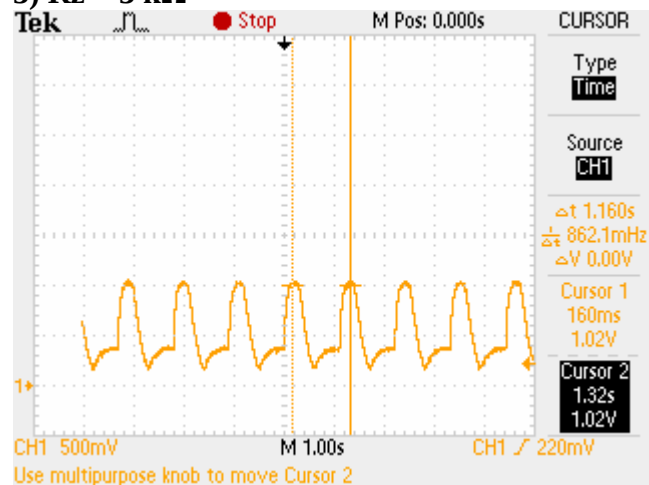
1) $R_z = 100 \Omega$



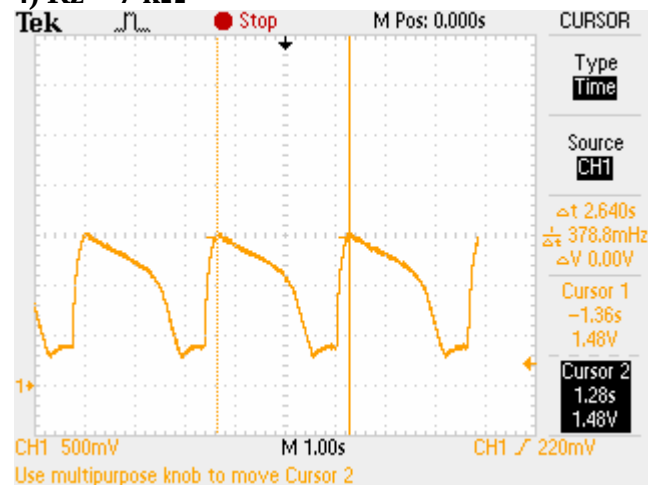
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



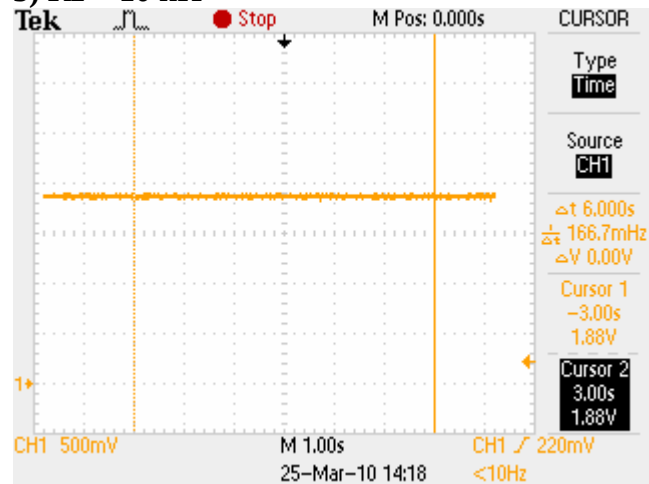
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



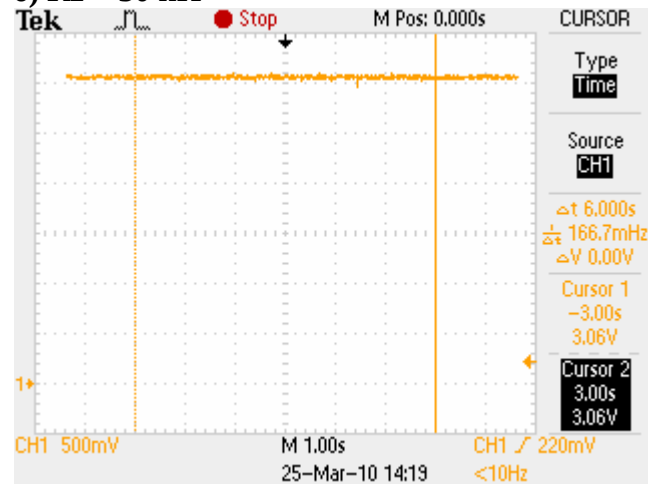
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

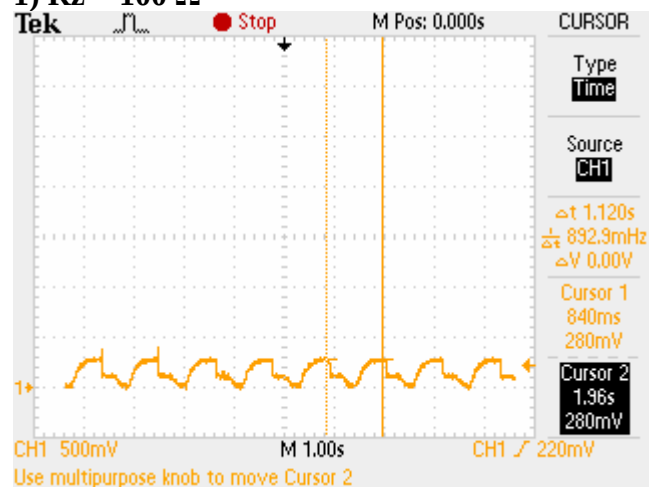


Průběhy výstupního napětí DC/DC měniče na čase při:

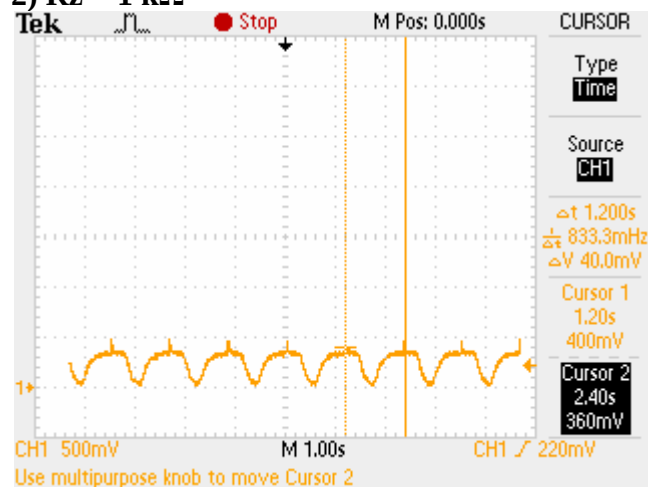
$U_n = 0,5 \text{ V}$, $R_i = 100 \Omega$

(měřítko napětí: 500 mV/dílek, měřítko času: 1 s/dílek)

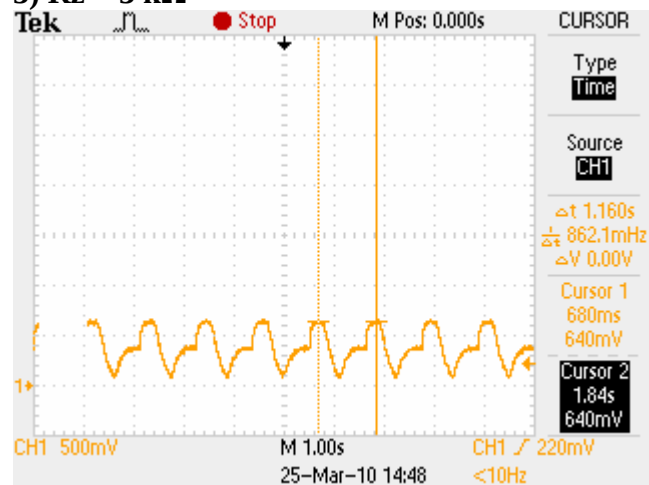
1) $R_z = 100 \Omega$



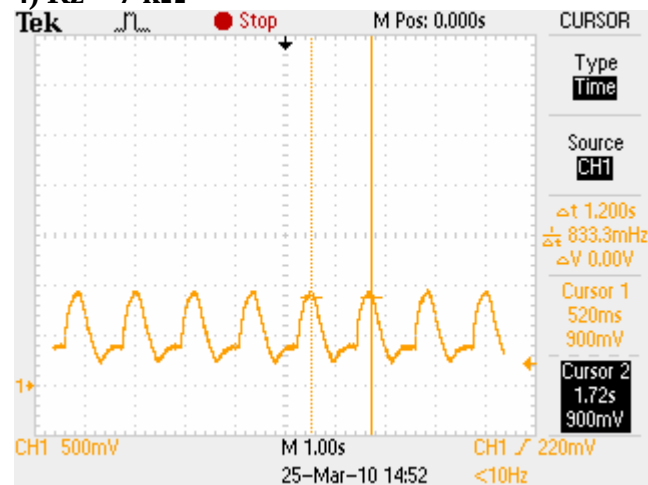
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



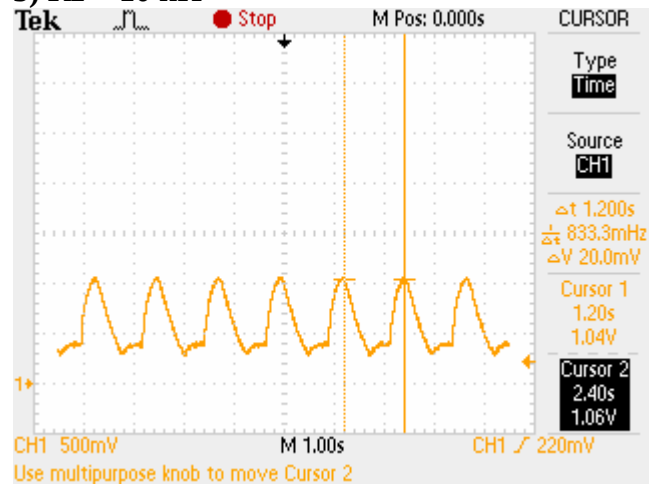
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



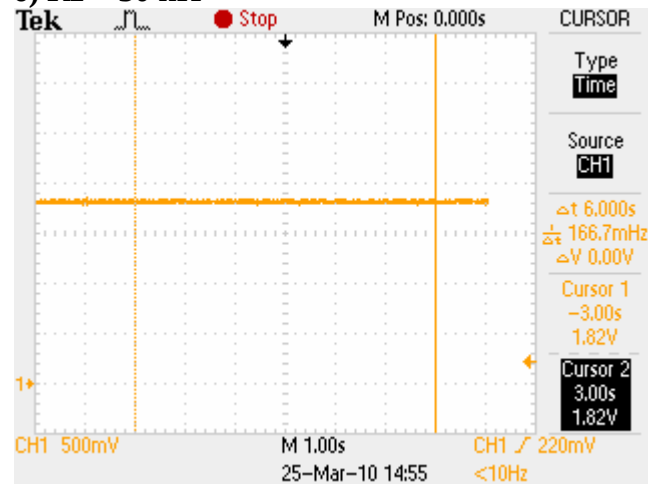
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$



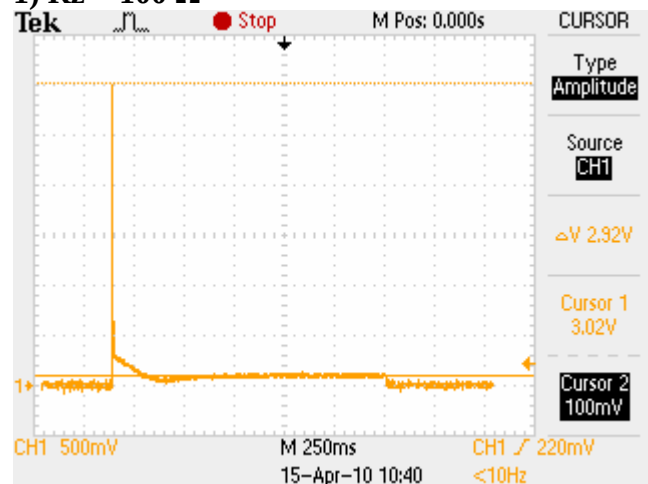
Příloha č. 3:

Odezvy výstupního napětí DC/DC měniče na spínání a rozepínání zatěžovacího odporu při :

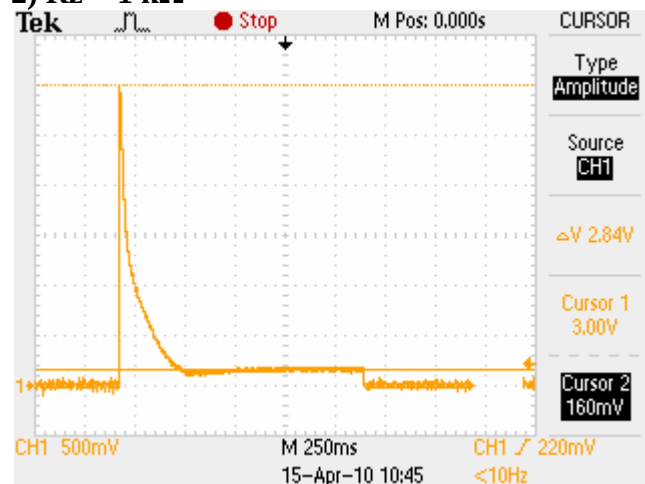
$U_n = 0,3 \text{ V}$, $R_i = 30 \Omega$

(měřítko napětí: 500 mV/dílek, měřítko času: 250 ms/dílek)

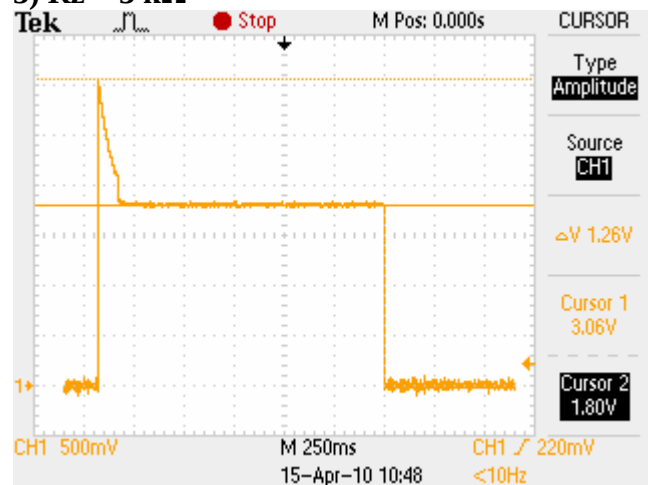
1) $R_z = 100 \Omega$



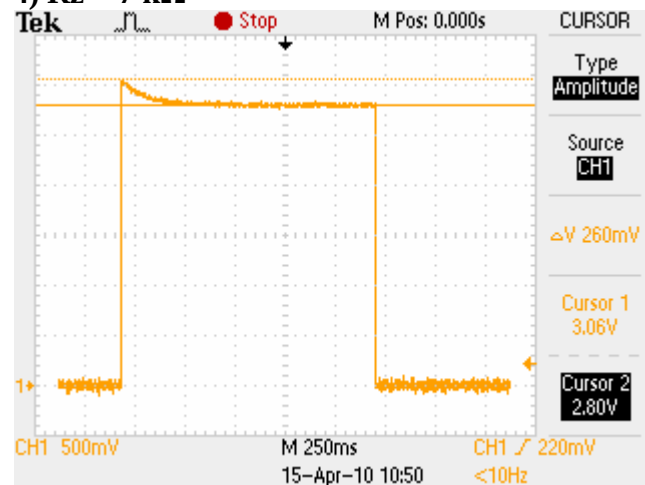
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



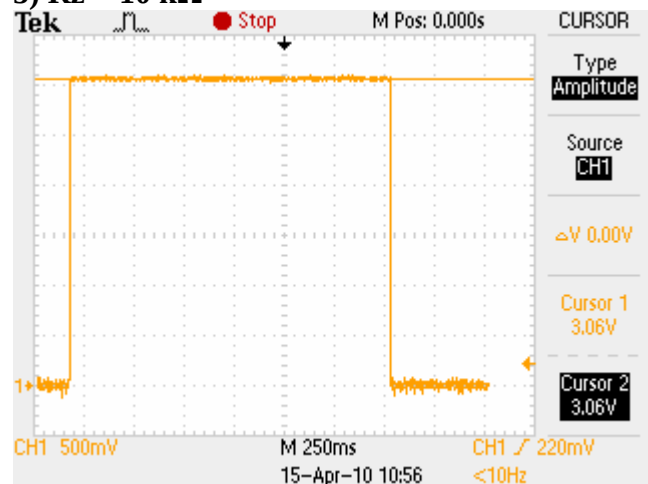
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



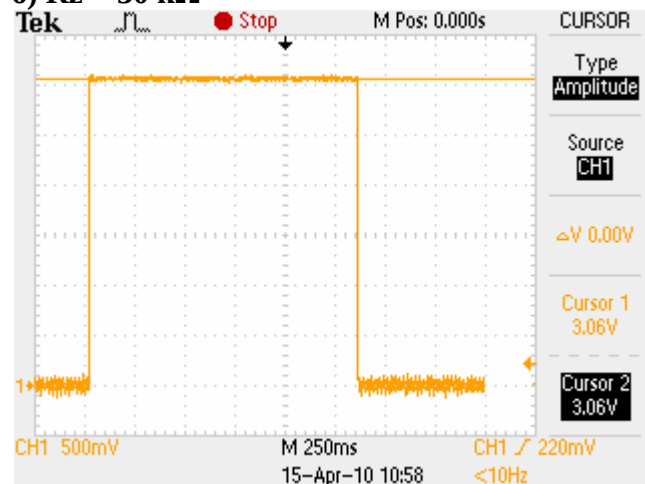
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

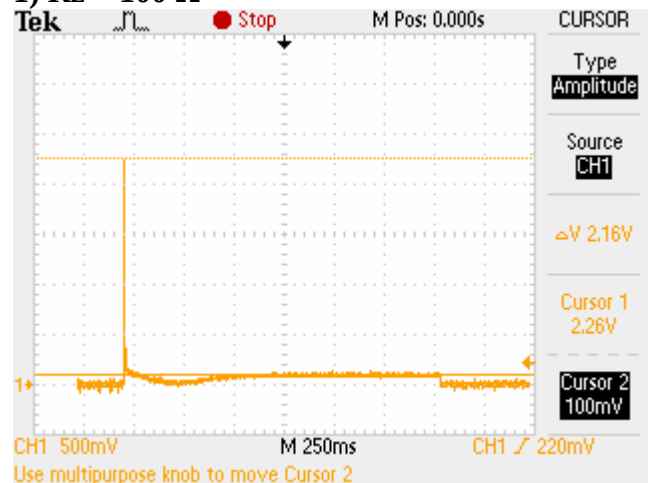


Odezvy výstupního napětí DC/DC měniče na spínání a rozepínání zatěžovacího odporu při :

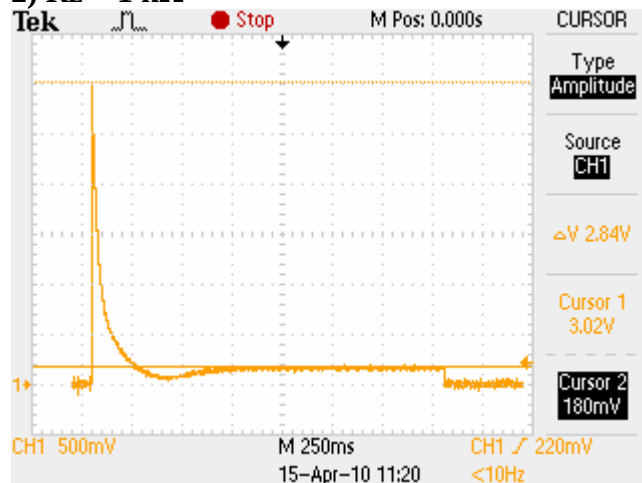
$U_n = 0,3 \text{ V}$, $R_i = 50 \Omega$

(měřítka napětí: 500 mV/dílek, měřítka času: 250 ms/dílek)

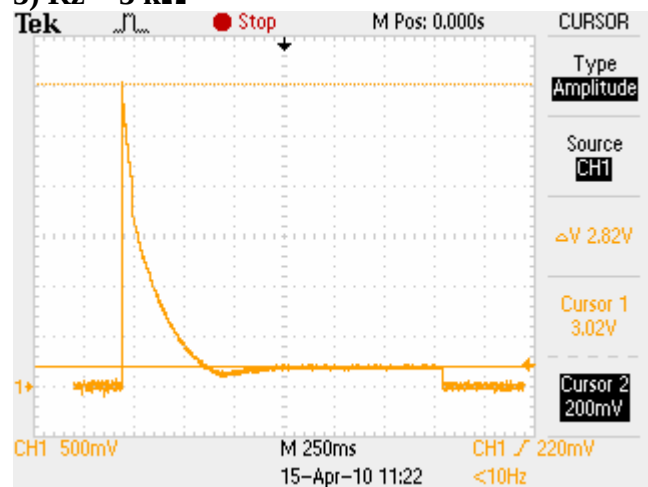
1) $R_z = 100 \Omega$



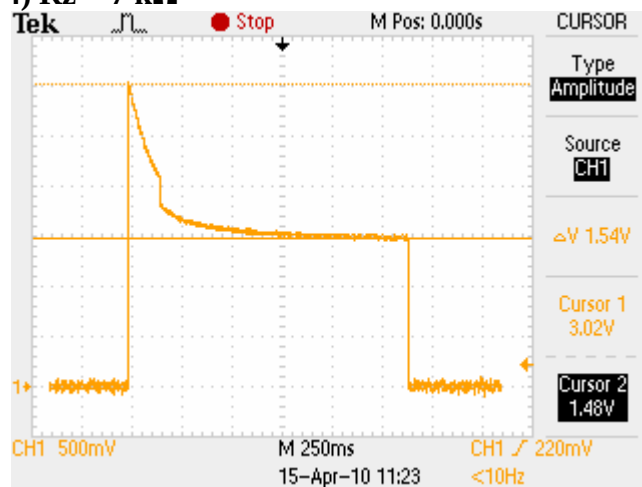
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



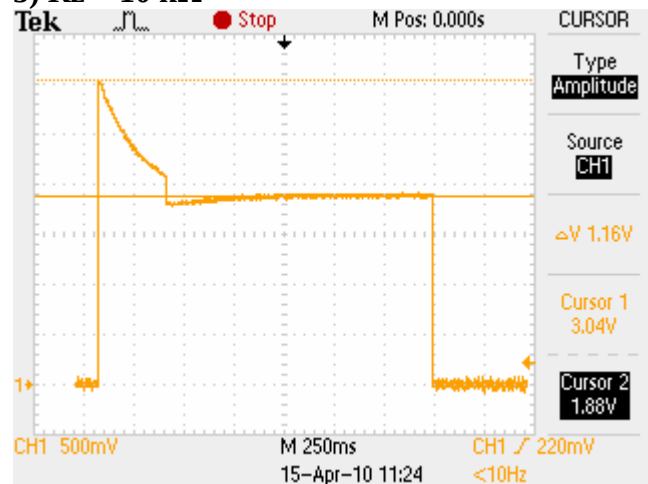
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



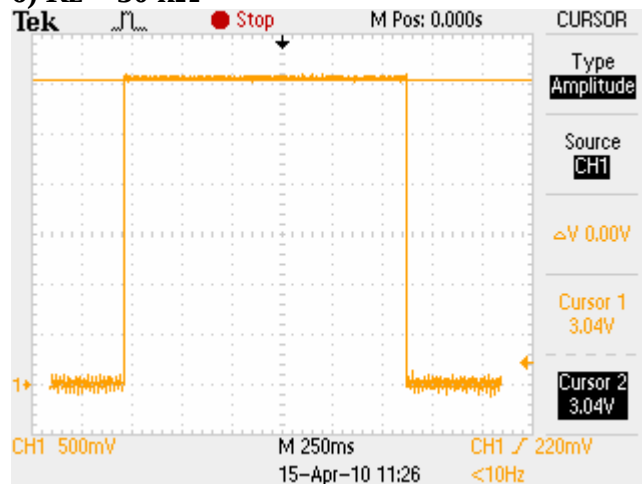
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

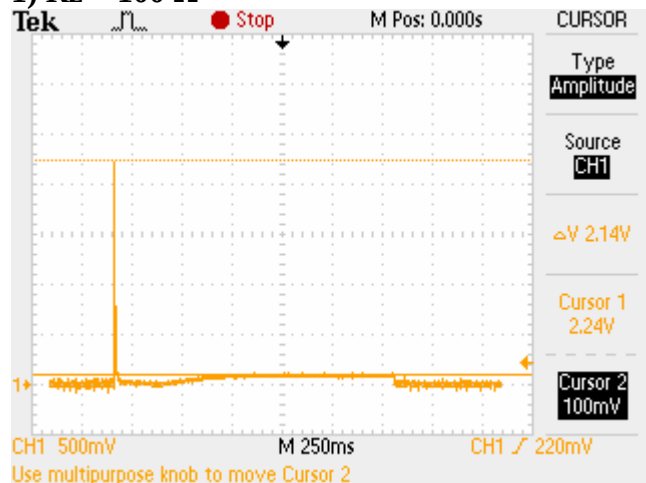


Odezvy výstupního napětí DC/DC měniče na spínání a rozepínání zatěžovacího odporu při :

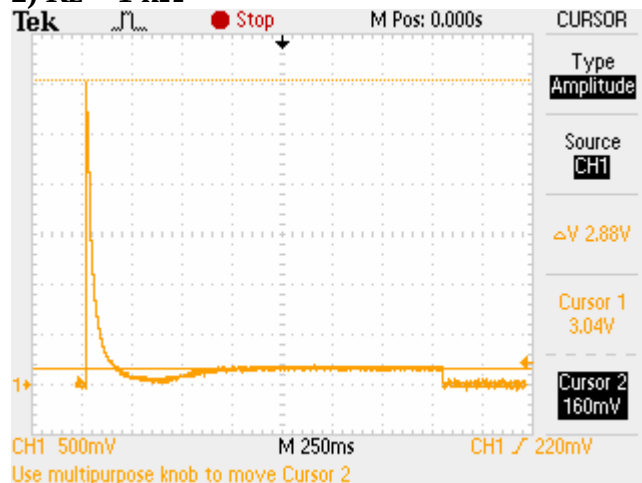
$U_n = 0,3 \text{ V}$, $R_i = 70 \Omega$

(měřítko napětí: 500 mV/dílek, měřítko času: 250 ms/dílek)

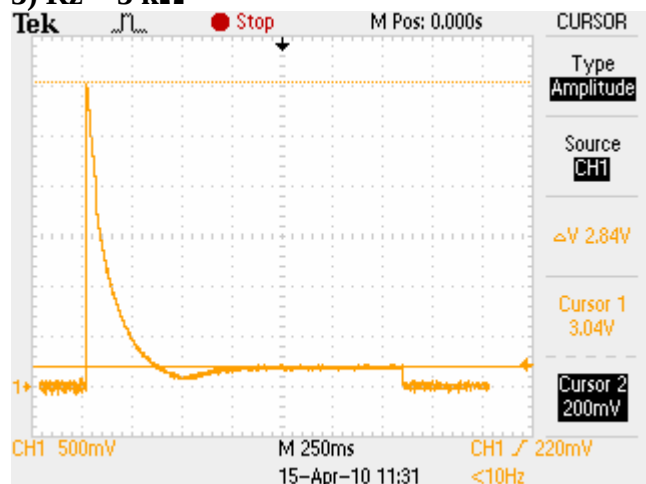
1) $R_z = 100 \Omega$



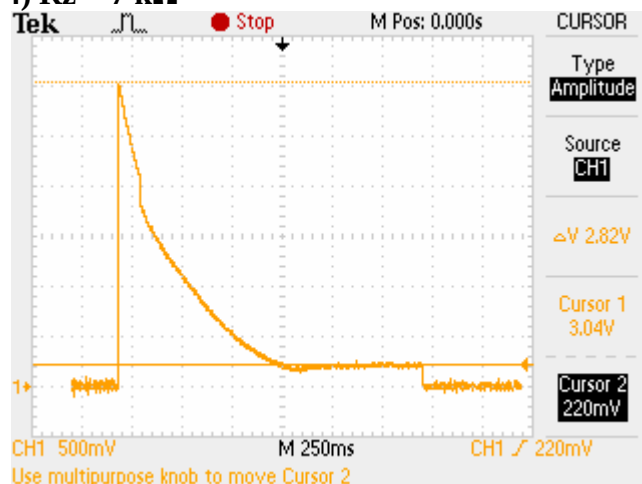
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



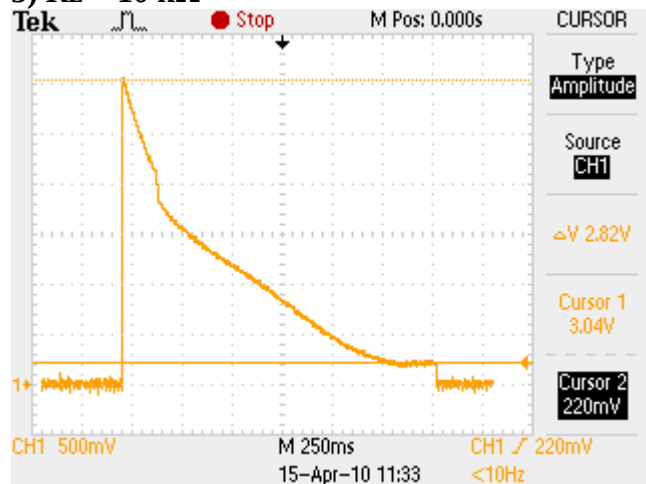
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



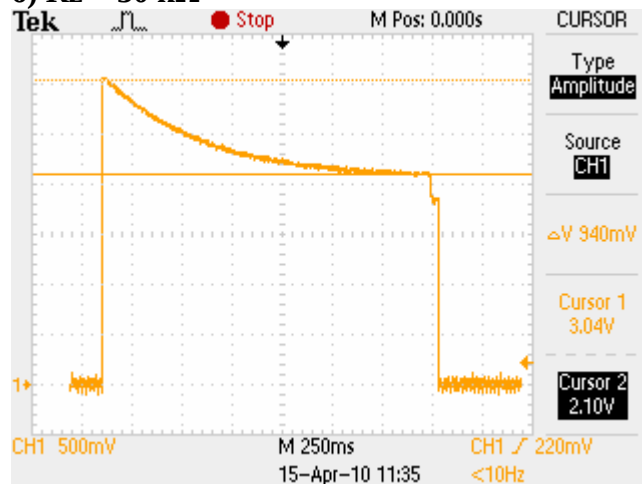
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

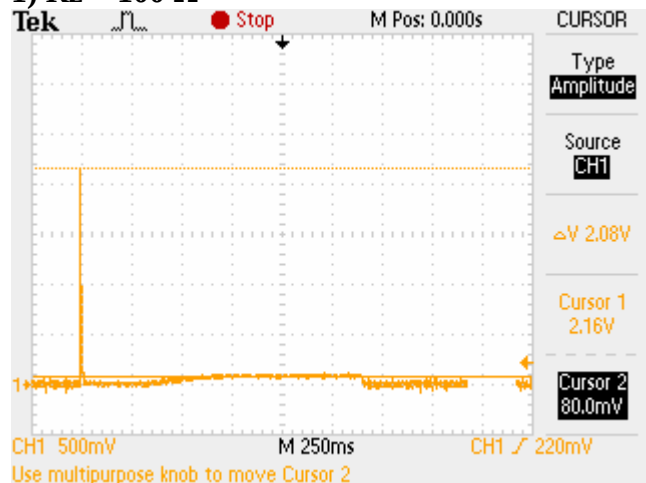


Odezvy výstupního napětí DC/DC měniče na spínání a rozepínání zatěžovacího odporu při :

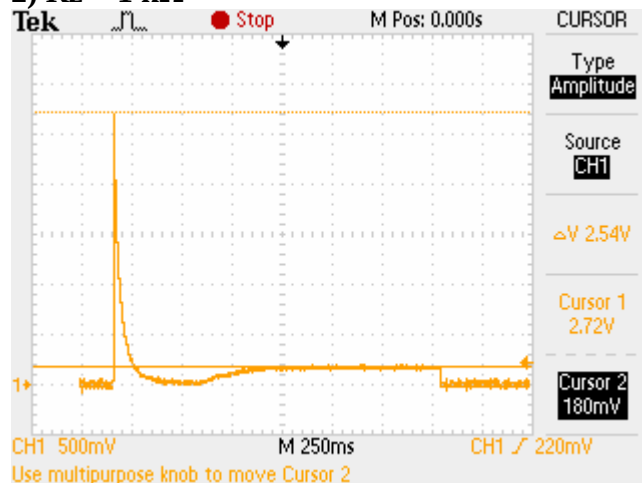
$U_n = 0,3 \text{ V}$, $R_i = 100 \Omega$

(měřítko napětí: 500 mV/dílek, měřítko času: 250 ms/dílek)

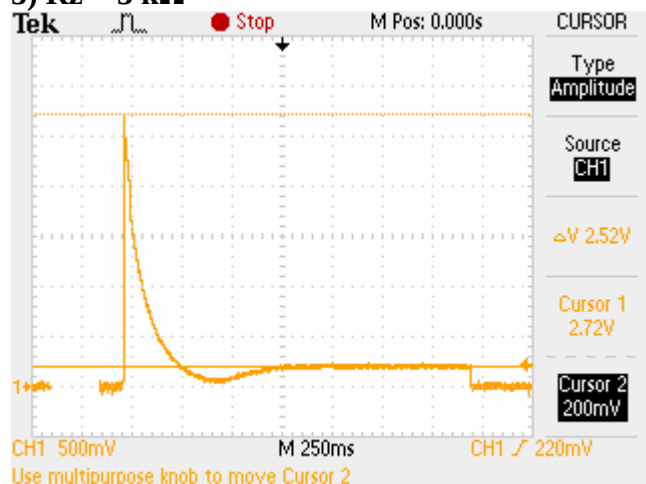
1) $R_z = 100 \Omega$



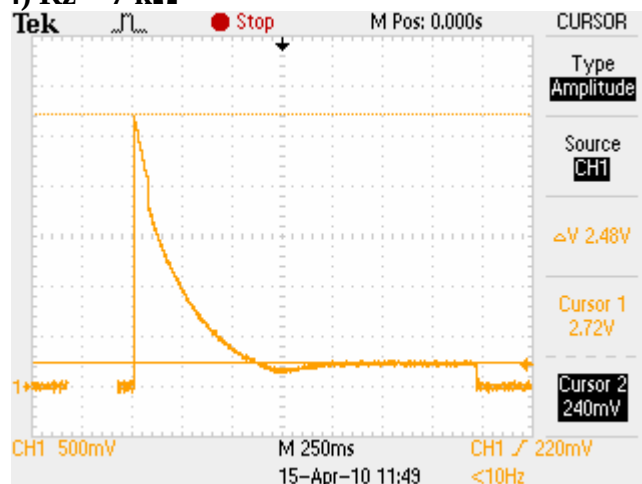
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



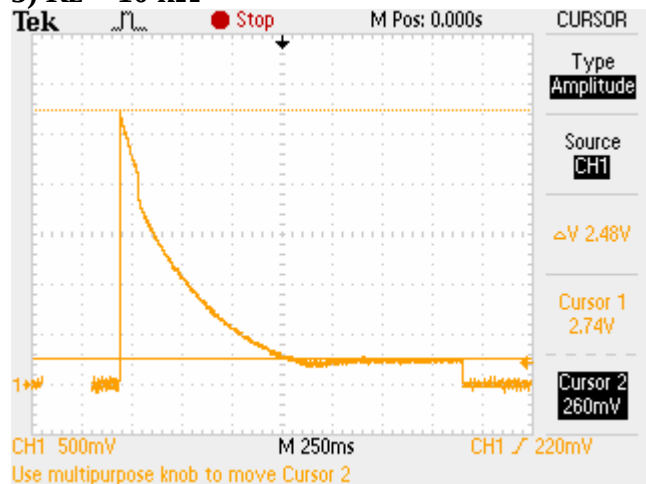
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



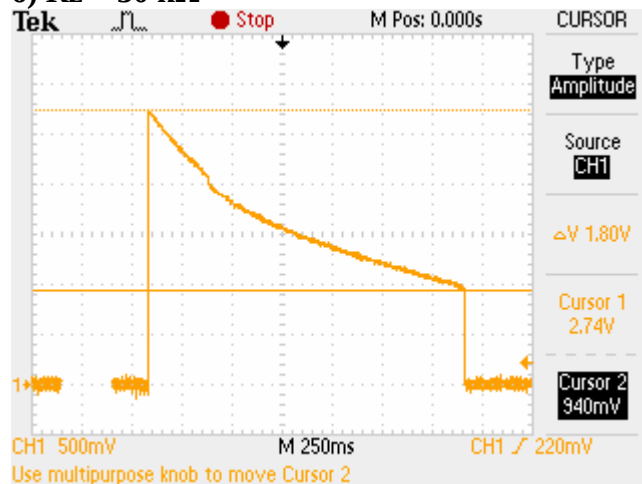
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

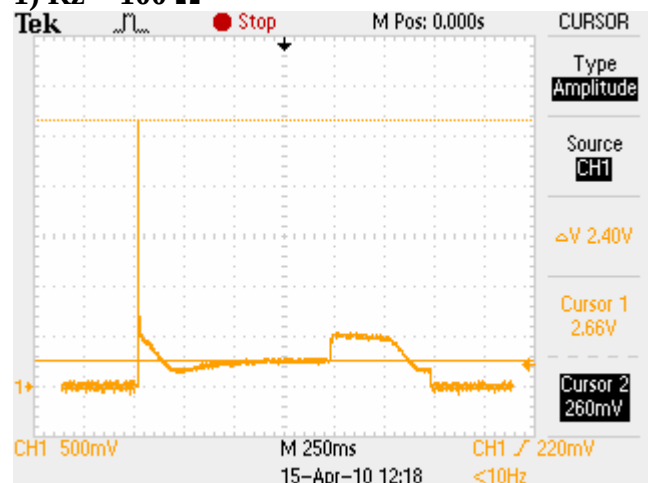


Odezvy výstupního napětí DC/DC měniče na spínání a rozepínání zatěžovacího odporu při :

$U_n = 0,5 \text{ V}$, $R_i = 30 \Omega$

(měřítka napětí: 500 mV/dílek, měřítka času: 250 ms/dílek)

1) $R_z = 100 \Omega$



2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



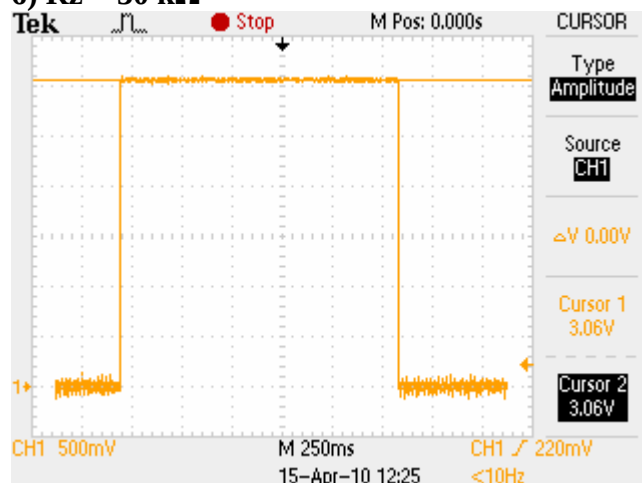
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

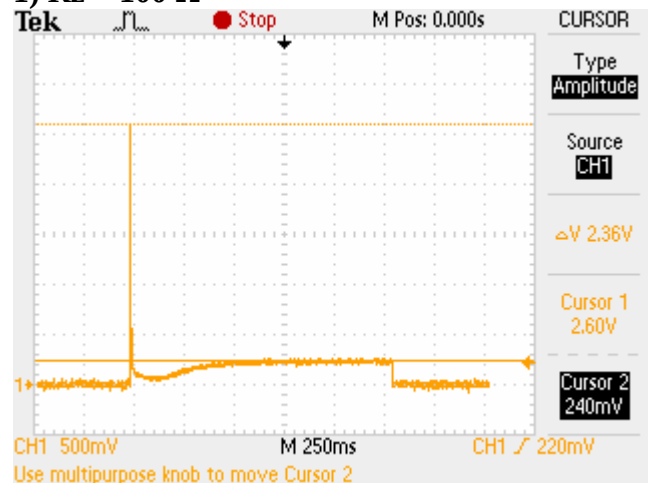


Odezvy výstupního napětí DC/DC měniče na spínání a rozepínání zatěžovacího odporu při :

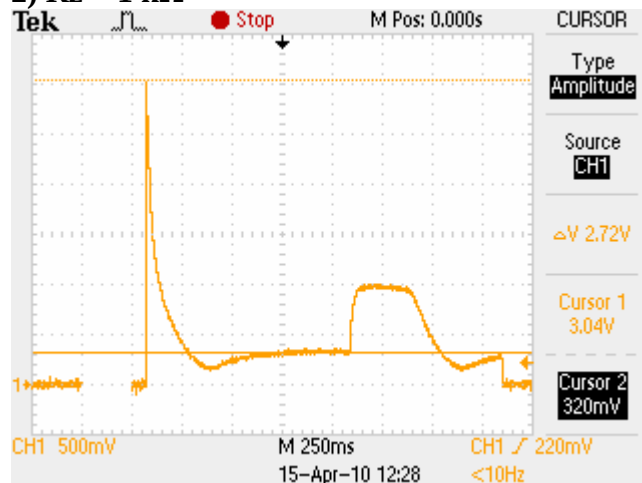
$U_n = 0,5 \text{ V}$, $R_i = 50 \Omega$

(měřítko napětí: 500 mV/dílek, měřítko času: 250 ms/dílek)

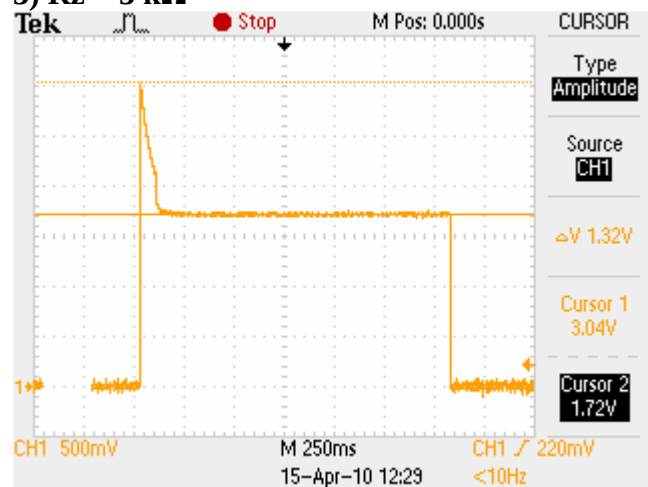
1) $R_z = 100 \Omega$



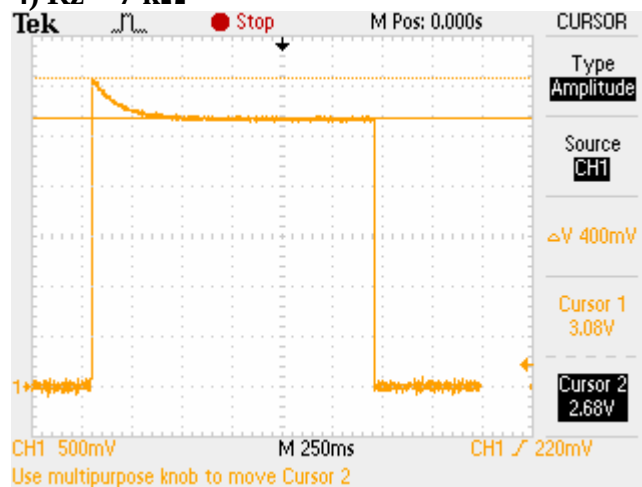
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



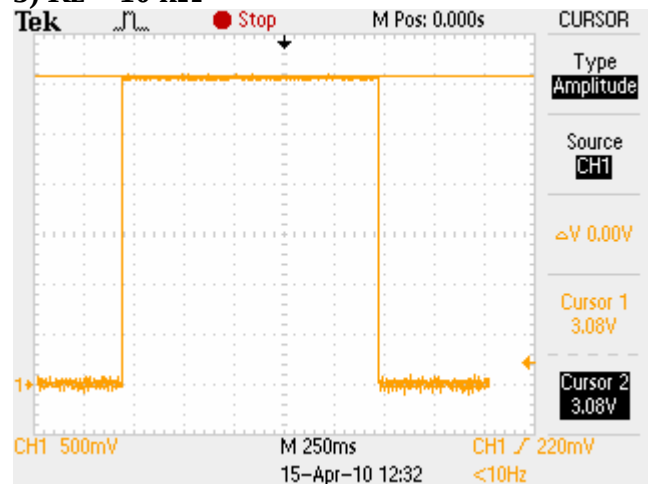
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



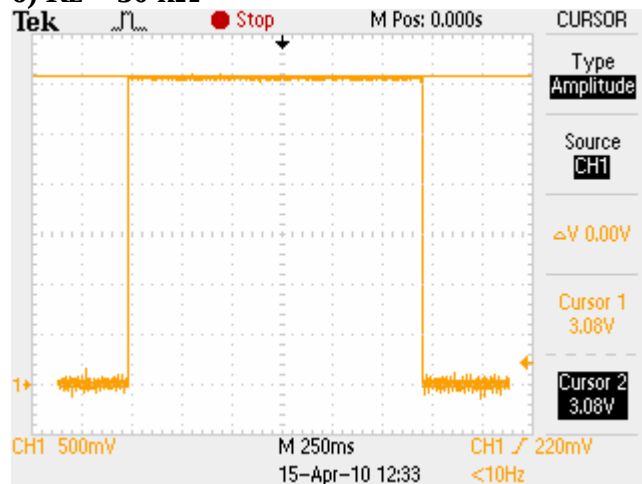
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

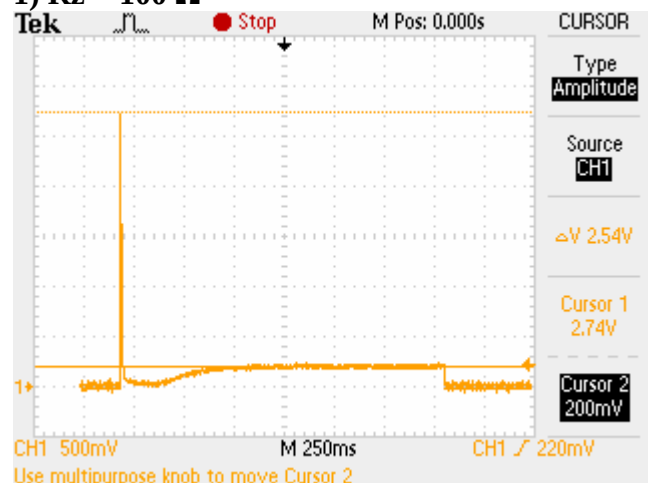


Odezvy výstupního napětí DC/DC měniče na spínání a rozepínání zatěžovacího odporu při :

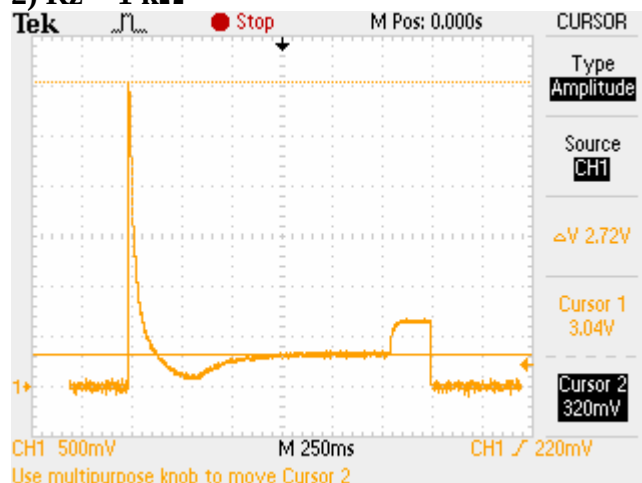
$U_n = 0,5 \text{ V}$, $R_i = 70 \Omega$

(měřítko napětí: 500 mV/dílek, měřítko času: 250 ms/dílek)

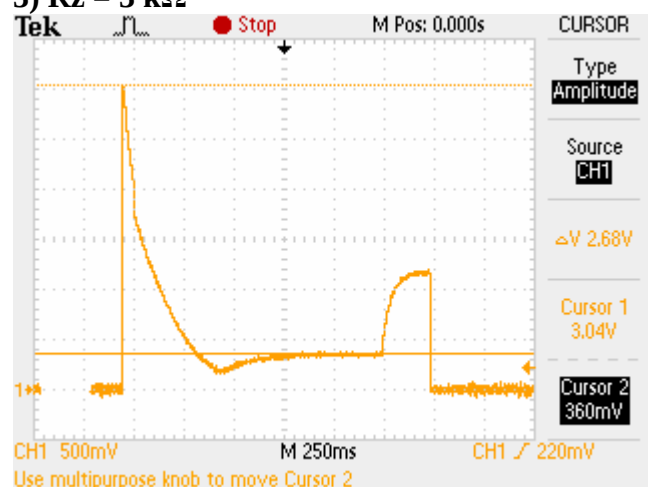
1) $R_z = 100 \Omega$



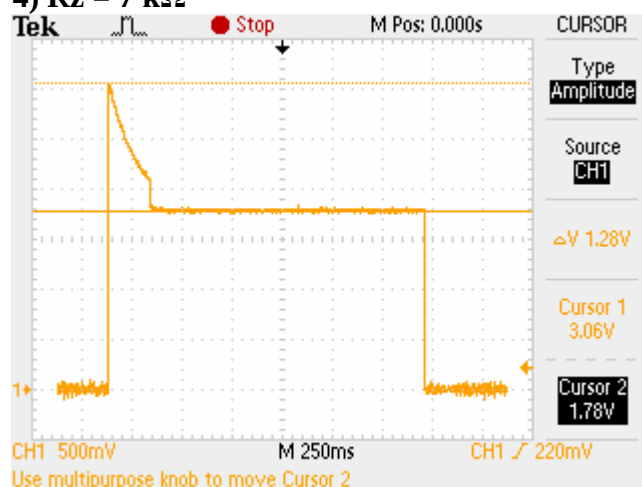
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



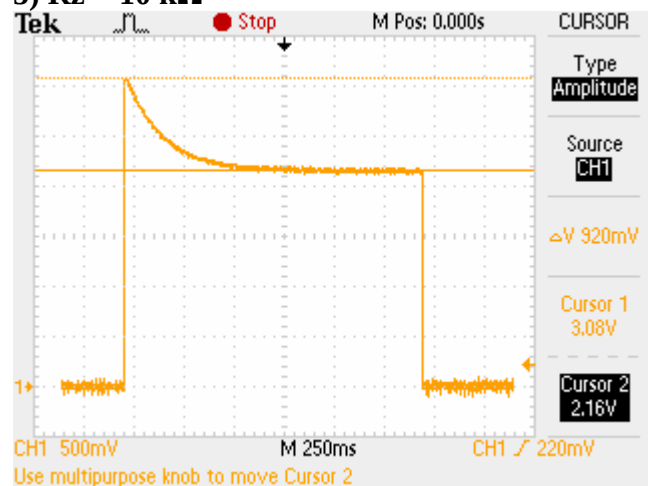
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



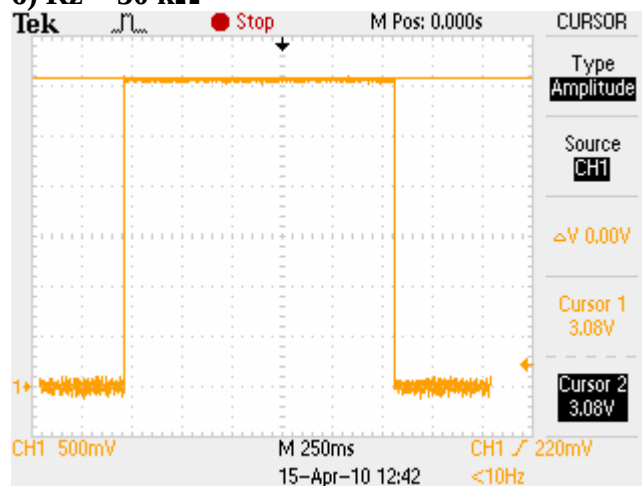
4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$

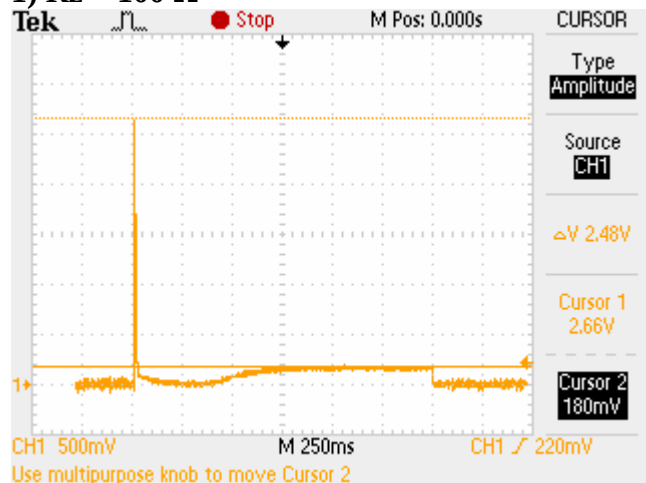


Odezvy výstupního napětí DC/DC měniče na spínání a rozepínání zatěžovacího odporu při :

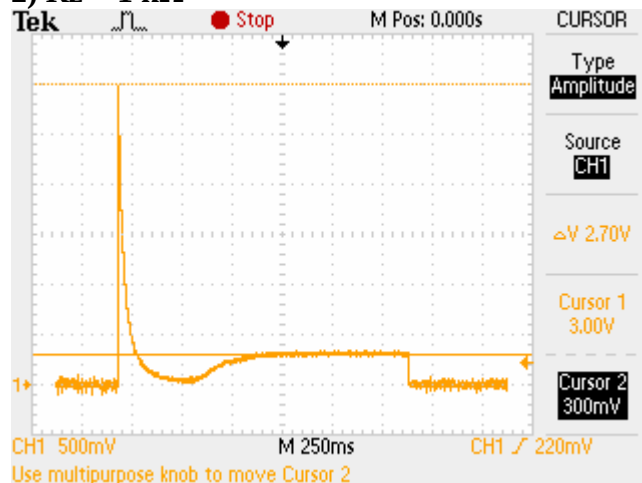
$U_n = 0,3 \text{ V}$, $R_i = 100 \Omega$

(měřítka napětí: 500 mV/dílek, měřítka času: 250 ms/dílek)

1) $R_z = 100 \Omega$



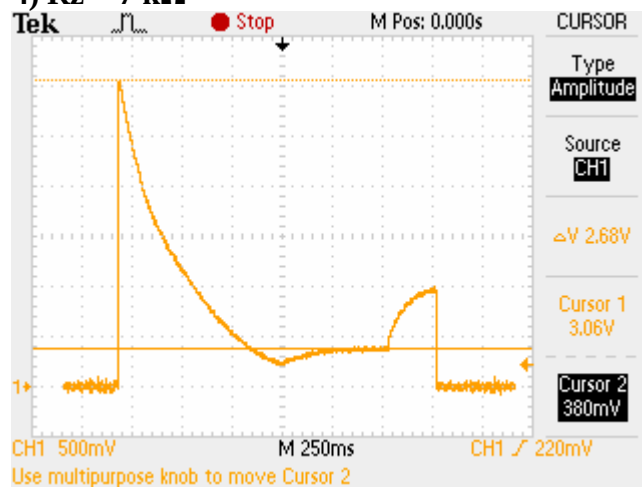
2) $R_z = 1 \text{ k}\Omega$



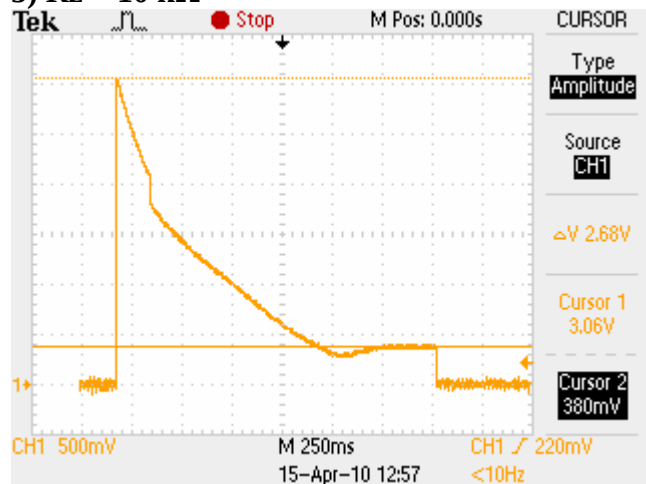
3) $R_z = 3 \text{ k}\Omega$



4) $R_z = 7 \text{ k}\Omega$



5) $R_z = 10 \text{ k}\Omega$



6) $R_z = 30 \text{ k}\Omega$



