

**ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
FAKULTA RIADENIA A INFORMATIKY**

Adaptívne riadenie systémov zberu energie z prostredia

Dizertačná práca

28360020183001

Študijný program: Aplikovaná informatika
Študijný odbor: 9.2.9 aplikovaná informatika
Pracovisko: Katedra technickej kybernetiky
Fakulta riadenia a informatiky, Žilinská univerzita v Žiline
Školiteľ: doc. Ing. Peter Ševčík, PhD.

Žilina, 2018

Ing. Samuel Žák

Abstrakt

Žák Samuel : Adaptívne riadenie systémov zberu energie z prostredia [Dizertačná práca]
 Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta riadenia a informatiky,
 Katedra technickej kybernetiky
 Školiteľ: doc. Ing. Peter Ševčík, PhD.
 FRI ŽU v Žiline, 2018.

V prírode je množstvo rozmanitých javov, ktoré môžu slúžiť ako zdroj energie. Súčasná úroveň technológií dokáže do istej miery zachytiť a premeniť ich energiu do využiteľnej podoby. Ľudstvo dlhý čas pokrývalo väčšinu svojich energetických potrieb z vyčerpatelných fosílnych zdrojov. Ich dlhodobé vedľajšie vplyvy podnecujú zvýšenie využívania iných - obnoviteľných - zdrojov.

Integráciu obnoviteľných zdrojov z prostredia do každodenného života v súčasnosti najviac brzdí riadiaca elektronika. Nekonzistentný výkon, obmedzená dostupnosť či iné komplikácie mnohých zdrojov taktiež zužujú okruh, kde je možné aplikovať získavanie energie z prostredia. Niektoré z týchto problémov je ale možné riešiť kombinovaným využívaním viacerých zdrojov súčasne. Nároky na správu napájania systému s takýmito heterogénnymi zdrojmi presahujú možnosti existujúcich riadiacich algoritmov.

Práca rozvíja ideu riadenia vychádzajúceho zo strojového učenia. Navrhovaný riadiaci algoritmus má k dispozícii spočiatku prázdny priestor, ktorého parametre sú všetky dôležité vlastnosti prostredia, a ktorého bunky obsahujú hodnoty riadiacich parametrov. Nastavenie hodnôt v bunke priestoru tak, aby systém spĺňal všetky požiadavky, prebieha pomocou optimalizačných algoritmov. Každý systém sa teda pred implementáciou musí najprv "naučiť" ovládať pripojené obvody a zdroje.

Obsah práce začína analýzou požiadaviek cieľových aplikácií, potenciálnych zdrojov energie a vlastností DC-DC meničov. Na základe dostupných informácií sú vytvorené modely výkonových strát vybraných obvodov, ktoré demonštrujú možnú výhodnosť navrhovaného riadenia. Analytická časť končí definíciou niekoľkých výpočtovo jednoduchých optimalizácií a ich testom na modelom vypočítaných priestoroch. Druhá kapitola sa venuje syntéze dostupných informácií a požiadaviek, výsledkom čoho je popis vlastností a aplikovateľnosti navrhovaného riadenia. Tretia kapitola obsahuje experimentálne testy kľúčových vlastností riadenia na reálnom systéme.

Kľúčové slová : heterogénny paralelný systém, zber energie z prostredia, internet vecí, DC-DC konvertor, adaptívne riadenie, strojové učenie

Abstract

Žák Samuel : Adaptive control of energy harvesting systems [Disertation thesis]

University of Žilina, Faculty of Management Science and Informatics,

Department of Technical Cybernetics

Tutor: doc. Ing. Peter Ševčík, PhD.

Žilina, 2018.

Nature offers a variety of phenomena that the mankind is able to use as a power source. Fossil fuels have been a dominant resource covering the power needs of the mankind for a long time now. The pressure from long term side effects of fossil fuel use motivates the development of other - renewable - power sources.

Present integration of renewable power sources into everyday life is constrained by power management electronics. Inconsistent and seldom available power output, common to many renewable power sources, is also an important limiting factor. While some of these issues can be resolved by the conjunction of multiple power sources in one system, the control complexity of such system exceeds the abilities of a simple regulator.

The thesis develops control algorithm based on machine learning. The core of the algorithm is a space. Its parameters are the values of ambient properties affecting the system - voltages, currents, temperatures etc. The cells of the space hold values of controlled parameters, which satisfy all requirements under given values of ambient parameters. However, this space is not filled by analytical computation. It is rather filled by an optimization algorithm working with a particular implementation of heterogeneous parallel system.

The contents of the thesis start with analysis of : the power needs of selected applications, the potential power sources, the properties of existing DC-DC converters. The gathered information is then used to synthesize mathematical models of power loss of selected DC-DC converter topologies. Mathematical models are used to evaluate the feasibility of heterogeneous parallel power management system and to test the performance of basic optimisation methods. Next sections describe necessary requirements and features of designed control algorithm. Thesis ends with practical experiments demonstrating key properties of the algorithm.

Keywords : heterogeneous parallel system, energy harvesting, internet of things, DC-DC converter, adaptive control, machine learning

Obsah

Zoznam použitých skratiek a cudzích slov	7
Zoznam ilustrácií a tabuliek	8
Úvod	10
Ciele práce	10
Štruktúra práce	11
1. Teoretické východiská	12
1.1 Internet vecí	12
1.2 Zdroje energie v prostredí	13
1.3 Existujúce DC-DC konvertory a správa napájania	15
1.3.1 Riadenie konvertorov	16
1.3.2 Prehľad vlastností existujúcich konvertorov	17
1.3.3 Ukážka existujúcich konvertorov	18
1.4 Model DC-DC konvertorov	21
1.5 Optimalizácia s nízkym výpočtovým výkonom	31
2. Heterogénny paralelný systém správy napájania	36
2.1 Návrh riadenia	36
2.1.1 Spôsoby vyrovnávania záťaže	36
2.1.2 Spojenie číslicového a analógového riadenia	38
2.1.3 Číslicové riadenie na základe priestoru riadiacich veličín ..	38
2.1.4 Adaptívne vyrovnávanie záťaže	41
2.2 Návrh modelových aplikácií	42
2.2.1 Konvertor s jednou topológiou	43
2.2.2 Konvertor s paralelnými vetvami	44
2.2.3 Komplexný systém	45
3. Experimentálne testovanie vlastností navrhovaného riadenia	48
3.1 Efektivita samostatného konvertora	49
3.2 Optimalizácia synchronného spínania	53
3.3 Rozloženie záťaže v konvertore s paralelnými vetvami	54
3.4 Riadenie zberu energie z prostredia	57
3.5 Zhrnutie výsledkov experimentov	59
Záver	61
Použitá literatúra	63
Príloha	69
Vlastné publikácie	70

Zoznam použitých skratiek a cudzích slov

AC-DC	– typ konvertora, ktorý mení striedavé napätie na jednosmerné
boost (step-up)	– topológia spínaného konvertora zvyšujúca napätie
buck (step-down)	– topológia spínaného konvertora znižujúca napätie
CCM	– z angl. Continous Conduction Mode – forma riadenia napäťových konvertorov
DC-DC	– typ konvertora, ktorý mení hodnotu jednosmerného napätia na inú úroveň jednosmerného napätia
DCM	– z angl. Discotinous Conduction Mode – forma riadenia napäťových konvertorov
efektivita	– (v tejto práci) energetická účinnosť, pomer dodávanej/výstupnej energie k odoberanej/vstupnej energii
fly-back	– topológia spínaného konvertora s transformátorom
greedy	– z angl. chamtivý, v kontexte - algoritmus, ktorý prevezme prvé riešenie, ktoré je výhodnejšie ako aktuálne (alternatívou je napr. prehľadať všetky riešenia a až potom sa pre nejaké rozhodnúť)
I2C	– z angl. Inter-Integrated Circuit – typ sériovej dátovej zbernice
IoT	– z angl. Internet of Things – Internet vecí
IT (spoločnosť)	– Informačné Technológie – v kontexte : spoločnosť zaoberajúca sa informačnými technológiami
kHz	– kilohertz
konvertor	– menič
kWh	– kilowatthodina
MPP (MPPT)	– z angl. Maximum Power Point (Tracking) – pracovný bod maximálneho výkonu (jeho sledovanie)
pin	– vývod integrovaného obvodu
PMIC (PMU)	– z angl. Power management integrated circuit (Power management unit) – obvod pre správu napájania
$\mu\text{W}/\text{cm}^3$	– mikrowatt na centimeter kubický
$\mu\text{J}/\text{N}$	– mikrojoul na newton
sepic	– typ topológie konvertora, angl. skratka “single-ended primary-inductor converter”
strieda	– činiteľ plnenia, pomerná doba zopnutia, pomer trvania aktívneho stavu signálu voči celej perióde

Zoznam ilustrácií

1	Ilustrácia rozsiahlej aplikovateľnosti internetu vecí	12
2	Schéma aplikácie obvodu TPS62770 ako inteligentného svetla zo senzormi [23]	18
3	Schéma zapojenia obvodu BQ25570 pri zbere energie z piezo-članku [23] .	19
4	Príklad aplikácie obvodu LTC3106, kde solárny panel predlžuje životnosť jednorazovej lítiovej batérie [22]	20
5	Schéma "Buck-Boost"konvertora zo štyrmi spínacími prvkami	21
6	Schéma transformátorového "Fly-back"konvertora	21
7	Schéma "Sepic"konvertora	22
8	Modelmi vypočítané priestory efektivity každého zapojenia s výstupným napätím 3,3V	27
9	Modelmi vypočítané priestory efektivity každého zapojenia so spínacou frekvenciou 300kHz	28
10	Prekrytie vypočítaných priestorov pri výstupnom napätí 3,3V a rôznych frekvenciách	29
11	Mapa zobrazujúca rozloženie záťaže vytvárajúce najmenšiu výkonovú stratu pri rôznych podmienkach	30
12	Diagram priebehu "brute force" algoritmu	32
13	Diagram priebehu základného "hill climbing" algoritmu	33
14	Diagram priebehu základnej podoby algoritmu simulovaného žihania	34
15	Bloková schéma potencionálne výhodného spojenia číslicového a analógového riadenia	38
16	Všeobecná definícia problému pre optimalizáciu riadenia	39
17	Bloková schéma vysvetľujúca vhodnosť výkonovej straty ako účelovej hodnoty	40
18	Priebeh spínania synchronných tranzistorov	43
19	Účelová funkcia optimalizácie spínania konvertora	44
20	Bloková schéma základného paralelného systému napájania	44
21	Účelová funkcia optimalizácie systému so solárnym panelom a jeho zálohou	45
22	Účelová funkcia systému so solárnym panelom a jeho zálohou	45
23	Účelová funkcia optimalizácie komplexného systému	46
24	Schéma buck-boost konvertora so štyrmi spínačmi a ovládačmi tranzistorov typu P (Q1 a Q2)	49
25	Efektivita Buck-Boost zapojenia zo štyrmi spínačmi pri podmienkach : $U_o = 3.3V$; $I_o = 10mA$	50
26	Efektivita Buck-Boost zapojenia zo štyrmi spínačmi pri podmienkach : $U_o = 3.3V$; $I_o = 100mA$	50
27	Efektivita Sepic zapojenia pri konštantnom výstupnom prúde	51

28	Efektivita Sepic zapojenia pri konštantnom výstupnom napätí	52
29	Priestor znázorňujúci najlepšiu spínaciu frekvenciu danej oblasti. Hodnota N/A označuje podmienky, pri ktorých obvod nedokázal dosiahnuť požadované napätie.	52
30	Výsledok výpočtu spínania synchronného sepic zapojenia.	54
31	Bloková schéma zapojenia experimentu s paralelnými vetvami	55
32	Nameraná efektivita a aktivita vetiev paralelného systému pri výstupnom napätí 3,3V a prúde 10mA	56
33	Nameraná efektivita a aktivita vetiev paralelného systému pri výstupnom napätí 3,3V a prúde 100mA	57
34	Bloková schéma zapojenia experimentu s heterogénnymi zdrojmi	58
35	Namerané rozdelenie aktivity vetiev systému pri premenlivom výkone záťaže	58
36	Paralelné zapojenie experimentu zo sekcie 3.4	69
37	Zapojenia jednotlivých konvertorov použitých pri experimentoch	69

Zoznam tabuliek

1	Porovnanie energetických potenciálov rôznych zdrojov vhodných pre zber energie [2].	14
2	Zoznam súčiastok použitých v modeli obvodu	23
3	Porovnanie času výpočtu modelového priestoru rôznymi metódami	35
4	Nameraný čas výpočtu optimalizácie na reálnom zapojení jednej topológie	53

Úvod

Vývoj ľudstva je úzko spätý so zdrojmi energie, ktoré je schopné využívať. Od dreva, uhlia či ropy po prvý fotovoltaiický panel alebo jadrový reaktor. Najväčšie kroky ľudstva vždy sprevádza nový zdroj energie. Alebo naopak?

Využívanie mnohých súčasných zdrojov energie podmieňujú špecifické podmienky. Existuje preto mnoho zariadení, procesov a radiacích algoritmov umožňujúcich premenu energie zo zdroja do užitočnej podoby. Zdokonaľovaniu týchto procesov je venované veľké úsilie. Pre niektoré zdroje to znamená predchádzanie zlyhaniu s katastrofálnymi následkami, no pre iné ide hlavne o zvýšenie energetickej účinnosti či flexibility nasadenia. Nezanedbateľné úsilie ide aj do vývoja spotrebičov energie. Teplo domova, obľúbené vozidlo či kávovar by nemali dnešnú podobu bez adekvátnej schopnosti ľudstva spracovávať energiu. Vo svete, kde sú zdroje energie obmedzené, je vývoj v tejto oblasti nevyhnutný. Úsilie v tomto smere nás tiež môže posunúť k väčšiemu komfortu či novým možnostiam.

Ciele práce

Elektrina je jedným z najuniverzálnejších spôsobov narábania s energiou. Elektrická energia môže byť bez veľkej námahy premenená na pohyb, teplo či svetlo. Táto práca sa sústreďuje na využívanie elektrickej energie všadeprítomnou elektronikou. Veľká väčšina súčasných elektronických zariadení používa jeden zdroj elektrickej energie. Pre mnohé zdroje a záťaž, ktoré výrazne nemenia svoju charakteristiku je to dostačujúce. Avšak pre aplikácie s dynamickými vlastnosťami je v istých prípadoch výhodné či priamo nevyhnutné využívanie viacerých zdrojov s výrazne odlišnými vlastnosťami. Najväčšou prekážkou tejto funkcionality sú v súčasnosti obvody napájacieho systému. Ich riadenie má typicky na starosti základný analógový regulátor. Jeho nedostatkom pre komplikovanejšie zapojenia je monotónna radiaca charakteristika – t.j. na kladnú odchýlku vie meniť radiacu veličinu len jedným smerom a na zápornú len opačným. Zakomponovanie špeciálnych požiadaviek do riadenia zvykne byť preto realizované hardvérovou nadstavbou. Vhodnou, no v súčasnosti zriedkavou alternatívou je použitie číslicového riadenia. Parametre základnej funkcionality má, v porovnaní s analógovým riešením, horšie v mnohých smeroch. Implementácia pokročilých funkcií je avšak jednoduchá. Prispôbovanie sa premenlivým vlastnostiam zdrojov z prostredia či zásobovanie záťaže energiou z viacerých zdrojov je potom vecou softvéru. Riadenie heterogénneho paralelného systému je vyvíjané v mnohých odvetviach – počítačové siete, výpočtové strediská, priemyselná výroba či vojenská technika. Pre systém zdrojov a spotrebičov jednosmerného napätia vhodný radiaci algoritmus stále chýba. Cieľom práce je tento stav zmeniť. Cesta k tomuto cieľu začne overením zmysluplnosti podstaty heterogénneho paralelného systému pre napájanie jednosmerným napätím. K overeniu budú slúžiť matematické modely obvodov radiacích tok energie. Pomocou nich je možné jednoducho

vytvoriť modely aplikácií, na ktorých bude riadenie vyvíjané. Výsledný algoritmus bude následne otestovaný na reálnom zariadení.

Ciele práce je teda možné zhrnúť do nasledovných kľúčových bodov :

- Matematické overenie výhodnosti heterogénneho paralelného systému DC-DC meničov z hľadiska účinnosti.
- Návrh adaptívneho riadiaceho algoritmu heterogénneho paralelného systému DC-DC meničov.
- Experimentálne testovanie vlastností riadiaceho algoritmu na reálnom systéme.

Štruktúra práce

Práca je rozdelená do troch základných častí : analýza, syntéza, experiment.

Prvá kapitola má analytický charakter. Kapitola začína motiváciou, významom a uplatnením cieľ a práce. Následne je opis súčasného stavu súvisiacej technológie a definície existujúcich metód, ktoré práca používa. Prevzaté elektrotechnické poznatky sú tu priamo použité na výpočet modelov strát vybraných obvodov. Modely následne slúžia na porovnanie výhodnosti niekoľkých bežných optimalizačných metód.

Druhá kapitola na základe syntézy uvedených informácií opisuje kľúčové vlastnosti a algoritmy navrhovaného spôsobu riadenia. Riadenie heterogénneho paralelného systému musí oproti jednoduchému regulátoru vyriešiť komplikácie v oblasti : vyrovňovania záťaže medzi paralelné vetvy, presnosti a rýchlosti odozvy výstupu, identifikácie riadeného systému, adaptácie riadenia za behu. Navrhnuté riešenia sú pre zrozumiteľnosť použité na troch ukážkových aplikáciach.

Tretia kapitola sa venuje experimentálnemu testovaniu vlastností navrhnutého riadenia na reálnom systéme. Testovanie sa sústreďí na kvalitu dosiahnutého riešenia v paralelnom systéme, ale aj na rýchlosť nájdenia riešenia v jednotlivých vetvách tohto systému.

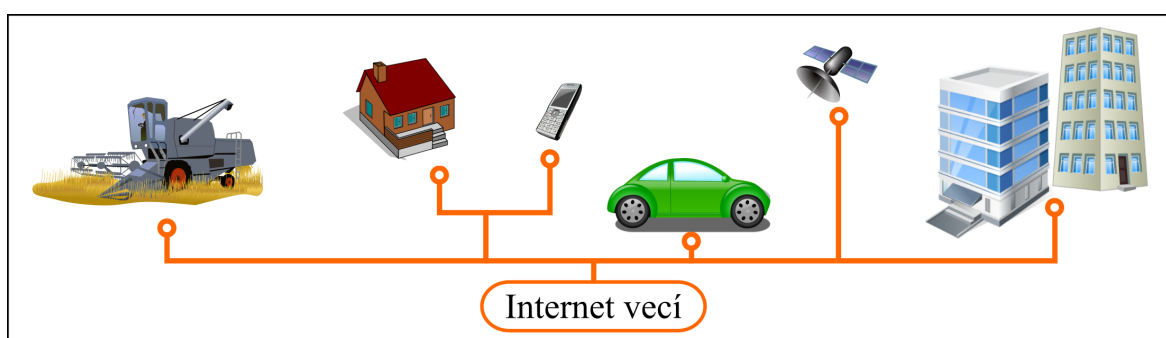
Teoretické východiská

V tejto kapitole sú zhrnuté teoretické a praktické informácie, ktoré slúžia ako základ práce. Tieto informácie bližšie vysvetľujú motiváciu práce, súčasný stav technológie ako aj niektoré javy a metódy použité pri neskoršej syntéze nového riešenia. Kapitola obsahuje aj simuláciu opísaných javov.

1.1 Internet vecí

Mobilné zariadenia sú do veľkej miery obmedzované zdrojom energie. Horšie je to už len pri zariadeniach, ktoré majú trvalé nasadenie v oblasti bez elektrickej siete. Príkladom takýchto aplikácií sú zariadenia tvoriace takzvaný “internet vecí”. Internet vecí označuje aplikácie dátovo prepojenej bežnej elektroniky. Môže ísť o budík, televízor, žiarovku či kávo-var, ktoré spolu dokážu komunikovať a tak plniť istú úlohu – napr. začať variť kávu krátko po zvonení budíku. Vo všeobecnosti sú to senzory, ovládacie, riadiace alebo signálne prvky. V súčasnosti sa veľa IT spoločností (Intel, Cisco, Texas Instruments,...) venuje rozširovaniu softvérových a hardvérových schopností internetu vecí [1]. Jedným z cieľov tohto vývoja je zvýšenie automatizácie celej spoločnosti. Domácnostiam ale aj komerčným spoločnostiam to prinesie úžitok v podobe zvýšeného komfortu, bezpečnosti či nižších nákladov. Druhou motiváciou vývoja sú dáta. Mnoho dát. Pomocou nich je možné pochopiť vzťahy a javy, o ktorých by inak neexistovali záznamy. Získané informácie potom môžu slúžiť k identifikácii slabého článku pri zlyhaní či optimalizácii, alebo k objaveniu nevyužitého potenciálu. Implementácia internetu vecí, môže mať podobu aj špecializovanej elektroniky nasadenej len za účelom zberu dát. Takéto senzory sú bežne schopné zaznamenávať stav svojho okolia ako napríklad počasie, znečistenie, hluk a iné. Z týchto záznamov je podľa umiestnenia senzorov následne možné zistiť požiar, plynulosť premávky, nezákonný výrub v lese, zosuv pôdy, prítomnosť osôb/zvierat a podobne. Predchádzanie a minimalizácia škôd krízových stavov sú taktiež podnety na rozvoj internetu vecí.

Zdrojom dát môžu byť aj medicínske implantáty ako skrutky, kĺby či zubárske plomby. Záznam denných aktivít, činnosti srdca, obsahu stravy a mnohých ďalších faktorov pres-



Obr. 1: Ilustrácia rozsiahlej aplikovateľnosti internetu vecí

nejšie definuje zdravotný stav používateľ a, čo umožní jeho lekárovi rýchlejšiu a presnejšiu diagnózu. Sensory v tele môžu pomôcť aj v krízových prípadoch, včasným varovaním alebo priamo zavolaním lekárskej pomoci. Tu však začínajú aj negatíva internetu vecí. Dátové spojenie okolitých predmetov vytvára tiež priestor pre kybernetický útok alebo zneužitie zberaných dát. Po prelomení zabezpečenia dáva internet vecí útočníkovi kontrolu nad ovládanými systémami alebo schopnosť podstrčiť zavádzajúce dáta o službách či akciách a následne profitovať z konania obete. Tieto bezpečnostné riziká sú zdrojom obáv pred krádežou, ochranou súkromia, či obmedzovaním ľudskej slobody štátmi alebo spoločnosťami.

Fungovanie internetu vecí je závislé na princípoch mnohých oblastí. Zo strany softvéru sú to najmä : sieťové inžinierstvo, kryptografická bezpečnosť, databázové systémy, spracovanie veľkého množstva dát. Z hardvéru sú to hlavne : vývoj senzorov, elektronika s nízkou spotrebou, fyzická vrstva komunikácie, správa napájania. Táto práca sa zaoberá oblasťou, ktorá nasadenie senzorických sietí obmedzuje najviac – napájaním. Súčasné možnosti operácie drobnej elektroniky mimo dosah elektrickej siete sú odkázané na použitie elektrochemického článku alebo solárneho panelu. Zriedka využívajú obe naraz. Cieľom práce je vytvorenie správy napájania, ktorá dokáže využívať väčší počet zdrojov.

1.2 Zdroje energie v prostredí

Väzba na elektrickú sieť do značnej miery obmedzuje škálu nasadenia internetu vecí. Nezávislosť od elektrickej siete je možné dosiahnuť využitím zdrojov energie v prostredí nasadenia. Mnoho prírodných javov môže slúžiť na tvorbu elektrickej energie [2]. V tabuľke 1 je zobrazený energetický potenciál javov, ktoré sú dnes najbežnejšie zvažované či využívané ako zdroje elektrickej energie.

Slnko poskytuje zo všetkých súčasne dostupných zdrojov najviac energie. Najjednoduchší spôsob získania jeho energie je založený na fotovoltackom jave. Hlavným prvkom, na ktorom tento jav bádame, je polovodičový prechod, ktorý premieňa dopadajúci slnečný svit priamo na elektrické napätie. Komplikovanejšie metódy premieňajú teplo vytvorené osvitom. Používajú k tomu elektromagnetickú indukciu v turbíne alebo termoelektrický jav. Vo všeobecnosti sa dá povedať, že turbína je výhodná pre vyšší výkon (100W a viac) a termoelektrický jav pre menší výkon. Výhodou termoelektrického javu je jeho škálovateľnosť na minimalistické rozmery, kde najmenší článok môže mať rozmer už od 2x2cm [6] [10].

Ďalší spôsob ako zabezpečiť energiu pre drobnú elektroniku je premenou mechanickej energie na elektrickú. To je možné dvoma spôsobmi. Buď pomocou spomínanej elektromagnetickej indukcie alebo piezoelektrického javu. Elektromagnetická indukcia je jav, pri ktorom zmena magnetického poľa v slučke vodiča vytvára v danom vodiči elektrický prúd. Realizácia teda vyžaduje magnet, indukčný prvok a zdroj zmeny ich vzájomnej polohy. Piezoelektrický jav vytvára elektrický náboj pri deformácii materiálu vykazujúceho tento jav. Oba spôsoby je možné využiť v malých rozmeroch, avšak piezo jav má v tejto aplikácii väčší potenciál, pretože piezoelektrické materiály je možné vytvoriť v rozmeroch mikro- až

Tabuľka 1: Porovnanie energetických potenciálov rôznych zdrojov vhodných pre zber energie [2].

Zdroj energie	Energetický potenciál	Zdroj údajov
Akustické vibrácie	0.003 μ W/cm ³ @ 75dB 0.96 μ W/cm ³ 100dB	Rabaey, Ammer, Da Silva Jr, Patel, & Roundy, 2000
Teplotný rozdiel	10 μ W/cm ³	Roundy, Steingart, Fréchet, Wright, Rabaey, 2004
Rádiové vlny	1 μ W/cm ²	Yeatman, 2004
Slniečny svit	100 mW/cm ² (priamy svit) 100 μ W/cm ² (svetlá miestnosť)	PVOutput.org
Termoelektrický jav	60 μ W/cm ²	Stevens, 1999
Vibrácie (elektromagnet)	4 μ W/cm ³ (ľudský pohyb) 800 μ W/cm ³ (priemysel)	Mitcheson, Green, Yeatman, & Holmes, 2004
Vibrácie (piezoelektrický jav)	200 μ W/cm ³	Roundy, Wright, & Pister, 2002
Prúd vzduchu	1 μ W/cm ²	Holmes, 2004
Stlačenie tlačidla	50 μ J/N	Paradiso & Feldmeier, 2001

nano-metrov. Typický zdroj mechanickej energie je vietor alebo vodný tok, pre malé výkony to môžu byť aj vibrácie alebo samotné stlačenie tlačidla. Implementácia v medicíne dokonca umožňuje využitie činnosti svalov na tvorbu elektrickej energie.

Možným zdrojom energie môže byť ale aj obyčajná elektrochemická batéria. Jej použitie síce obmedzuje funkcionality celého zariadenia, no je najjednoduchšie a nezávislé od prostredia. Priemerná spotreba elektroniky v aplikáciach, ktoré sú väčšinu času neaktívne je na úrovni samovybíjania batérie. S jednou batériou teda môžu fungovať niekoľko rokov než bude potrebná jej výmena. Ide napríklad o :

- Zariadenia s úspornými senzormi, kde najväčšiu spotrebu tvorí hlásenie udalosti (čo nastáva zriedkakedy - napr. požiarne alarm).
- Zariadenia, ktoré sú aktívne veľmi malú časť dňa (napr. riedko vzorkované meteostanice, diaľkové ovládače).
- Zariadenia s extrémne nízkou spotrebou, ktoré sú aktívne vždy (napr. náramkové hodinky).

Zriedkavejším vyčerpatelným zdrojom s dlhšou pracovnou dobou a väčším výkonom je rozpad rádioaktívnych prvkov. K získaniu elektrickej energie zo žiarenia s nízkou vlnovou dĺžkou sa dá použiť aj fotovoltaiický jav no o mnoho častejšie je výhodnejší termoelektrický efekt. Takýto zdroj sa potom označuje ako termonukleárny a typicky sa používa pri vesmírnych misiách. Pre pozemské aplikácie sa prakticky nepoužíva [25].

1.3 Existujúce DC-DC konvertory a správa napájania

Elektronické zariadenia majú definovaný rozsah napätia, pri ktorom dokážu pracovať. Nie všetky zdroje elektrickej energie poskytujú napätie práve v tomto rozsahu. K problému prispieva aj rôznorodosť pracovných napätí rôznych kategórií elektronických zariadení. Pre zmenu úrovne jednosmerného napätia sa používa tzv. konvertor (nazývaný tiež DC-DC menič). Jeho úlohou je čo najefektívnejšia zmena napätia zo zdroja na požadovanú úroveň. Aplikácie však môžu mať aj komplikovanejšie požiadavky na napájanie, než len jednu úroveň napätia. Klasickými príkladmi sú špeciálne funkcie ako napríklad ochrana proti krátkodobému výpadku zdroja, potláčanie prúdových špičiek, alebo zníženie spotreby počas nečinnosti. Tieto požiadavky zabezpečuje špeciálne riadenie konvertora alebo sústavy konvertorov. Komplexné riešenie, na ktoré jednoduchý konvertor nestačí, sa zvyčajne nazýva systém riadenia napájania (z angl. power management). Realizácia riadenia napájania závisí od konkrétnej aplikácie. Riadenie napájania teda tvorí systém, v ktorom je funkcia hardvéru rozšírená a zdokonaľovaná softvérom [3] [4] [5] [12] [16] [17] [20] [21].

K zmene jednosmerného napätia patrí aj ďalšia činnosť a tou je jeho regulácia. Regulovaný zdroj napätia si udržiava konštantnú úroveň aj pri rôznych dodávaných prúdoch. Regulácia napätia je jednoducho integrovateľná do konvertora, preto dnešné konvertory poskytujú regulované výstupné napätie, čo v minulosti nemuselo platiť. Pre účely práce budeme predpokladať, že každý konvertor dodáva regulované napätie a regulátory budeme považovať za formu konvertora. Konvertory majú niekoľko ďalších špeciálnych prípadov so svojím špecifickým pomenovaním. Napríklad zapojenie konvertora, ktorý prenáša energiu kondenzátorom sa označuje nábojová pumpa. Pre účely práce môžeme aj toto špecifické označenie zanedbať.

Pre zmenu napätia zo zdroja existuje mnoho elektrotechnických topológií konvertorov. Konvertory je taktiež možné charakterizovať na základe týchto vlastností: rýchlosť odozvy na zmenu záťaže, zvlnenie výstupného napätia, efektivita, cena, komplexnosť riadenia, vlastná spotreba a iné [20] [22] [23]. Konvertory meniace jednosmerné napätie na inú úroveň jednosmerného napätia je možné z hľadiska funkcie rozdeliť nasledovne:

- **Lineárne konvertory** – Častejšie nazývané lineárne regulátory, pretože vynikajú v regulácii napätia na presnú hodnotu. Reguláciu výstupného napätia dosahujú čiastočným otvorením tranzistora, čím sa vytvorí napäťová strata. Tieto regulátory teda dokážu len znížiť napätie. Použitie lineárneho regulátora je z hľadiska straty výhodné pri malých rozdieloch vstupného a výstupného napätia alebo pre veľmi malé výstupné prúdy. Veľkou výhodou je tiež nízke zvlnenie výstupného napätia a rýchla reakcia na zmenu záťaže.
- **Spínané konvertory** – Fungujú tak, že striedavo pridávajú a odoberajú energiu hlavnému prvku. V elektrotechnike môže byť tento prvok cievka, transformátor, kondenzátor, ich kombinácie a mnohé iné súčiastky schopné krátkodobého uchovania energie. Úlohou

prvku je teda filtrovať pulzujúci tok energie v spínacích cykloch. Touto činnosťou môžu zvyšovať aj znižovať napätie. Väčšina zapojení dokáže prevádzať energiu v oboch smeroch zmenou riadenia (t.j. zo vstupu na výstup ale aj naopak). Zapojenie spínaného konvertora môže obsahovať aj viac tých istých topológií paralelne. Ide vtedy o tzv. paralelný konvertor, ktorý nájdeme napríklad vedľa každého výkonného procesora v stolnom PC alebo v serveri. Jednotlivé topológie v paralelnom zapojení sú typicky riadené s fázovým oneskorením, čím sa dosiahne menšie zvlnenie výstupu. Spojenie výstupu topológií na generovanie jedného napätia umožňuje tiež vysoký prúdový odber, ktorý po rozdelení medzi vetvy znižuje námahu na jednotlivých súčiastkach.

1.3.1 Riadenie konvertorov

Dôležitou súčasťou obvodu je aj jeho forma riadenia. V súčasnosti sú typické dva či tri spôsoby, ktoré môžu tvoriť jadro riadenia konvertora (v závislosti od zapojenia) [30] [31] [32].

- **Napäťové riadenie** – (z angl. Voltage mode control) Jednoduchý a univerzálny spôsob so spätnou väzbou založenou na odchýlke výstupného napätia od požadovanej hodnoty. Táto odchýlka je porovnávaná s pílovým signálom, čo vytvára riadiaci signál s modulovanou šírkou impulzu (PWM). Šírka impulzu je priamo úmerná odchýlke od požadovanej hodnoty.

- **Prúdové riadenie** – (z angl. Current mode control) Komplikovanejší spôsob, ktorý rozširuje regulačnú slučku o prúd pretekajúci hlavným prvkom. Pulzujúci prúd môže byť následne porovnávaný s odchýlkou napätia namiesto pílového signálu, čím sa podieľa na tvorbe riadiaceho signálu. Dve spätné väzby komplikujú návrh regulátora, no zároveň zabezpečujú stabilnejší výstup, rýchlejšiu prechodovú odozvu. Samotné meranie prúdu môže mať nízku toleranciu šumu a taktiež zvyšovať pokojový prúd (čiže znižovať energetickú účinnosť). Modernjšie implementácie tieto problémy potláčajú integráciou všetkých častí do jedného púzdra.

- **Hysterézne riadenie** – Najjednoduchšie riadenie vhodné len pre špecifické obvody. Poskytuje najrýchlejšiu prechodovú odozvu. Regulácia prebieha priamym porovnávaním výstupného napätia s referenčným. Pri poklese výstupu je priamo otvorený prísun energie až kým výstup nepresiahne referenciu.

Vyššie uvedené sú základné spôsoby riadenia spínaného konvertora. Všetky z nich majú monotónny charakter riadenia. To znamená, že pri hodnote nižšej než je požadovaná dokážu len pridať riadiacu veličinu, a pri presiahnutí len ubrať. Všeobecné spôsoby riadenia s nemonotónnym charakterom absentujú. Hlavným dôvodom je zriedkavejší výskyt aplikácií, ktoré sú závislé od nemonotónneho riadenia. Tieto prípady sú často riešené doplnkovými systémami, čo je pre jednoduché aplikácie jednoduchšie ako nahradenie slučky regulátora. Napríklad pri hľadaní bodu maximálneho výkonu solárneho panelu alebo pri nabíjaní/vybíjaní akumulátorov [13] [41]. Zložitosť implementácie hardvérových doplnkov rastie pre rozsiahlejšie riešenia rýchlejšie než zložitosť vývoja spôsobu nového riadenia.

1.3.2 Prehľad vlastností existujúcich konvertorov

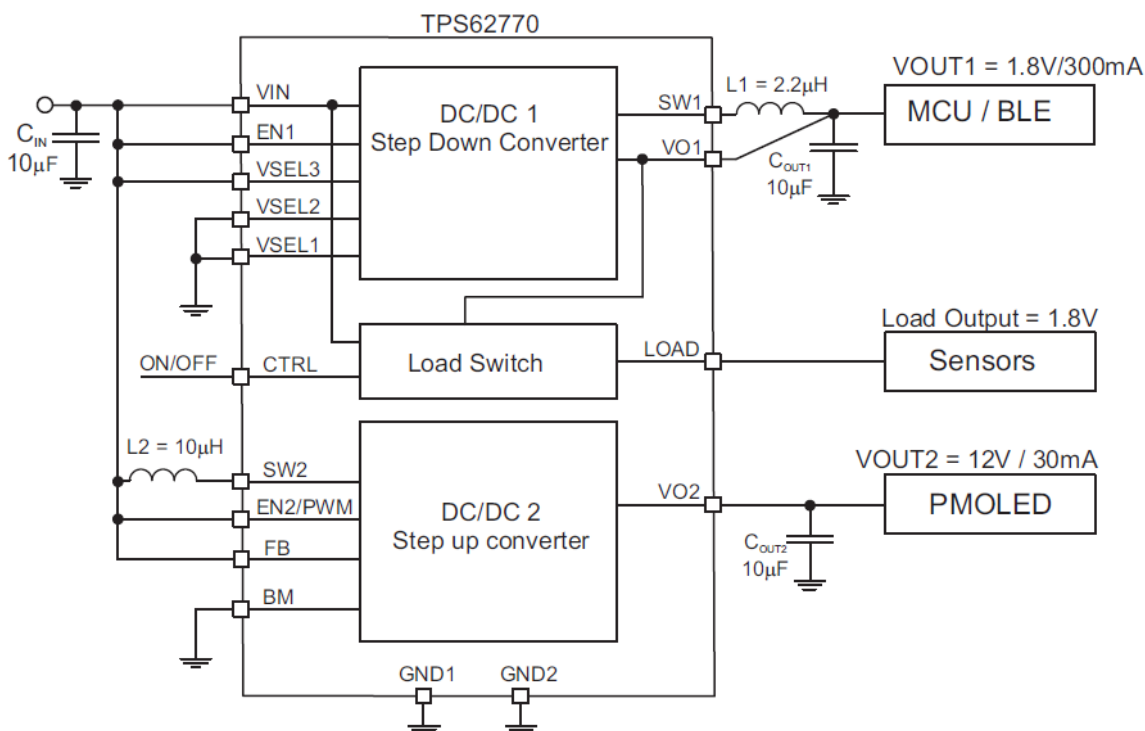
Aké vlastnosti poskytujú súčasné konvertory je najspoľahlivejšie zistiť z ich katalógových listov, ktoré sa dajú nájsť buď na stránke ich výrobcov alebo ich dodávateľov [20] [22] [23] [39]. Z prieskumu trhovo dostupných obvodov správy napájania vyplýva niekoľko poznatkov :

- Základné topológie sú často používané – jednoduché topológie „buck“ a „boost“ sú veľmi obľúbené. Každá z nich dokáže meniť napätie len jedným smerom (zvyšovať alebo znižovať), no zároveň majú nízky počet komponentov a z toho vyplývajúcu nízku cenu a veľkosť. Tieto vlastnosti sú dostačujúce pre mnohé aplikácie. Hoci existujú aj flexibilnejšie či efektívnejšie topológie, nie sú často používané. Najpravdepodobnejším dôvodom je teda výrazne vyššia cena zariadenia, pričom zvýšenie efektivity je len niekoľko percent. Pomer ceny ku efektivite je teda dôležitý faktor. Jednoduchšie systémy majú tiež menej komplikované riadenie, čo má tiež podiel na nižšej cene. Následne s jednoduchším riadením môže klesnúť aj vlastná spotreba, čo je ďalšia výhoda.
- Veľmi nízka vlastná spotreba – väčšina výrobcov sa aktívne snaží dosiahnuť čo najnižšiu vlastnú spotrebu obvodu. Vplyvom toho je možné použiť obvod v širšom spektre aplikácií. Predovšetkým tie, kde riadiaci prvok pracuje len zriedkavo a väčšinu času je v režime spánku. V takýchto prípadoch tvoria pokojové prúdy najväčšiu výkonovú stratu a vlastná spotreba konvertora zvykne byť podstatnou z nich.
- Konvertor s počítačom – na trhu nie je obvod, ktorý by kombinoval programovateľný procesor s vlastnou pamäťou a DC-DC konvertor. Komplikovanejší systém riadenia napájania je možné spravovať len z externého výpočtového prostriedku.
- Obmedzené softvérové nastavenia – ovládanie napäťových úrovní jednoduchých konvertorov je zväčša realizované napäťovým deličom alebo digitálnou hodnotou špeciálnych vývodov. Zriedkakedy je možné meniť tieto nastavenia softvérovo počas operácie.
- Špecializácia pre zdroje energie z prostredia – existujú obvody určené pre vyžívanie zdrojov energie z prostredia. Používajú rôzne metódy určenia maximálneho výkonu zdroja, ktoré sú typicky implementované hardvérovo. Pracovný bod týchto obvodov je v niektorých prípadoch nastavený napevno na špecifické podmienky, no existujú aj adaptívne riešenia (napr. operačný bod solárneho panelu a jeho závislosť na osvite).
- Vysoká cena špecializovaných obvodov – cena základných konvertorov sa pohybuje do 0.5 eura za kus pri maloodbere. Oproti tomu obvody s istou špecializáciou či inými vylepšeniami, stoja v rozmedzí od 2 do 10 eur.
- Správa napájania je viac než len konverzia napäťových úrovní – efektivitu využívania energie systémom je možné vylepšiť aj riadením. Bežne používané obvody dokážu v istej vetve na povel vypnúť alebo zapnúť energiu alebo v nej zmeniť napätie. Obe činnosti obmedzujú plytvaním energie.

1.3.3 Ukážka existujúcich konvertorov

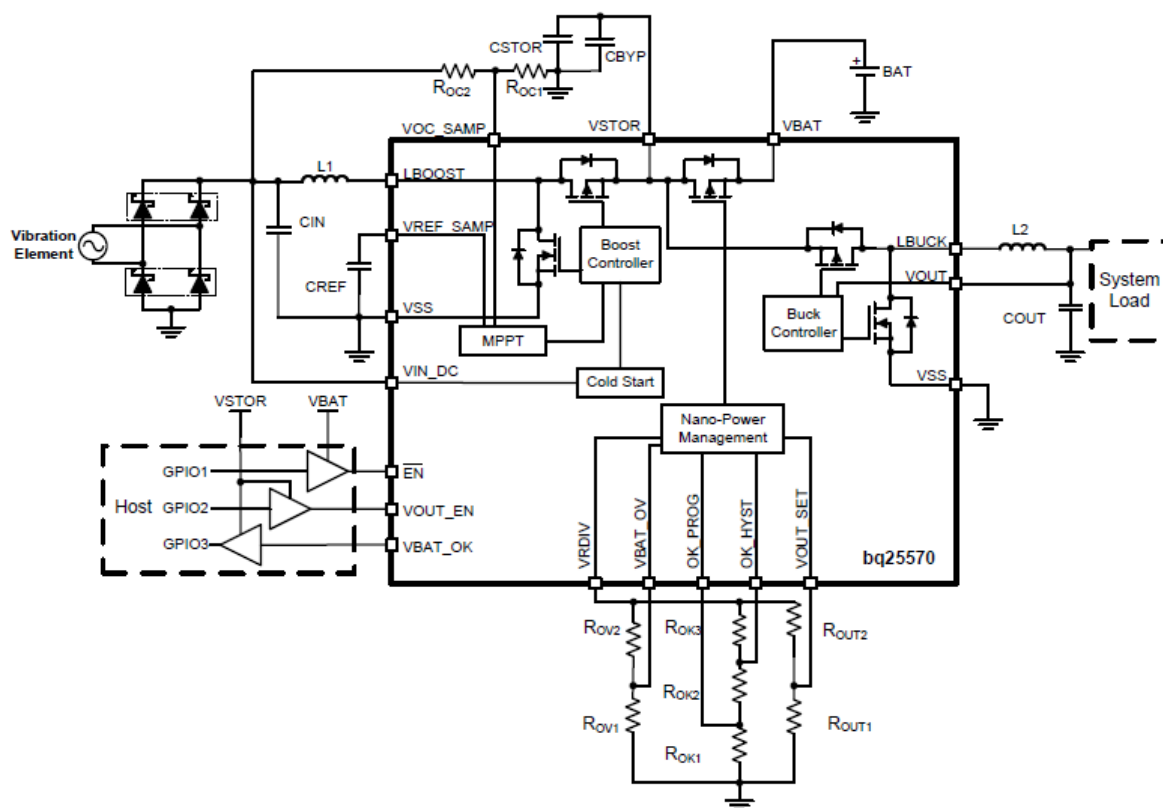
Pri prieskume existujúcich zariadení bolo vybratých niekoľko obvodov, ktoré implementujú pokročilé funkcie. Ide hlavne o nemonotónne riadenie pri odbere zo solárneho panelu a samotné určovanie jeho bodu maximálneho výkonu, správa akumulátora, prepínanie medzi viacerými zdrojmi (panel/akumulátor) a mnohé iné. Tieto obvody sú jednými z najpokročilejších existujúcich riešení v smere zaujímavom pre túto prácu. [4] [14] [21]

TPS62770 – Konvertor kombinujúci spínané topológie typu „buck“ a „boost“. Topológia znižujúca napätie má k dispozícii vetvu, ktorú je možné vypnúť. Tento obvod je určený predovšetkým pre akumulátor, nakoľko jeho vstupné napätie musí byť v rozsahu 2.5 až 5.5 V. Súčasne má jeho „buck“ vetva pokojový prúd len 0.37uA a jej výstupné napätie sa nastavuje digitálne na špeciálnych troch vývodoch. Tie umožňujú výber ôsmich hodnôt v rozsahu 1 až 3 V s maximálnym prúdom 300mA. Pri „boost“ topológii sa výstupné napätie určuje napäťovým deličom. Dosiahnuteľný pracovný rozsah tejto časti je 4.5 až 15 V. Maximálny prúd závisí od výstupnej kapacity a napäťového rozdielu, ktorý konvertor tvorí. Podľa týchto podmienok sa pohybuje od 30mA do 200mA. Oproti iným obvodom tento konvertor poskytuje riadenú vetvu, ktorá umožňuje odpojiť časť elektroniky od napájania (obrázok 2, kde je možné odpojiť senzory). Kombinácia „buck“ a „boost“ topológie tiež dovoľuje použitie úsporných riadiacich súčastí spolu s tými, čo vyžadujú vyššie napätie (napríklad výkonný bezdrôtový modul či LCD displej). Použitie dvoch osobitných čipov k tomuto účelu by malo za následok vyššiu pokojovú spotrebu. Výrobcom obvodu TPS62770 je spoločnosť Texas Instruments [23] .



Obr. 2: Schéma aplikácie obvodu TPS62770 ako inteligentného svetla zo senzormi [23]

BQ25504, BQ25505, BQ25570 – Sériá obvodov pre využívanie energie z prostredia od výrobcu Texas Instruments. BQ25505, BQ25570 sú schopné začať fungovať pri vstupnom napätí 330mV a pri poklese pokračovať v činnosti až do 100mV. Horná hranica ich vstupného napätia je 5,5V. Obvod BQ25504 sa od nich mierne odlišuje v tom, že dokáže pracovať do minimálneho napätia 80mV a doporučené maximálne má hodnotu 3V. Všetky ďalej obsahujú správu nabíjania akumulátora, do ktorého ukladajú nazberanú energiu a v prípade potreby ju z neho dodávajú na výstup. Napäťové hranice nabíjania a vybíjania sa nastavujú napäťovými deličmi. Všetky obvody obsahujú MPPT funkciu, pomocou ktorej dynamicky zistujú bod maximálneho výkonu metódou nezaťaženého napätia. Nastavenie pracovného bodu prebieha každých 16 sekúnd odpojením záťaže, meraním charakteristiky zdroja a následným výpočtom. Obvody sa odlišujú výstupnou časťou. BQ25570 má na výstupe „buck“ konvertor, ktorý upravuje napätie akumulátora pre aplikáciu. BQ25504 tento konvertor nemá a výstup je odoberaný priamo z akumulátora. BQ25505 tento konvertor nahradil vstupnou vetvou, kde je možné pripojiť nenabíjateľnú batériu. Funkčne má táto vetva najnižšiu prioritu, čo znamená, že je z nej odoberaná energia len v prípade nedostatku energie od zberacieho prvku a nabíjateľného akumulátora zároveň [23].

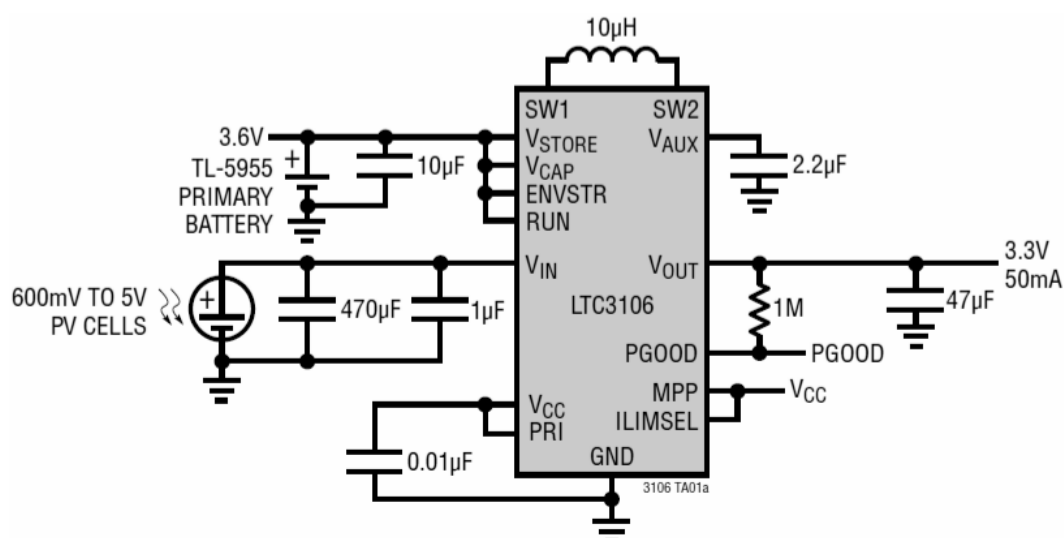


Obr. 3: Schéma zapojenia obvodu BQ25570 pri zbere energie z piezo-članku [23]

AXP209, AXP221 – Sériá obvodov čínskeho výrobcu „X-Powers“ riadiacich napájanie pre komplexnejšie zariadenia. Tieto obvody paralelne kombinujú mnoho konvertorov. Napríklad obvod AXP209, ktorý nájdeme v jednodoskových počítačoch „OLinXino“ alebo „Banana-

Pi“, obsahuje dva Buck konvertory, päť lineárnych regulátorov a obvod nabíjací lítiový akumulátor. Takéto aplikácie používajú množstvo paralelných konvertorov pre udržiavanie viacerých nezávislých úrovní napätí. Alternatívne riešenie viacerými diskretnými konvertormi zaberá viac miesta na plošnom spoji. Zhuk konvertorov v jednom obvode je kompaktnejší a dovoľuje rôzne softvérové funkcie. Napr. ochrana pred preťažením, meranie energie v akumulátore, a samostatne programovateľné napäťové úrovne. Výrobca má niekoľko podobných alternatív AXP obvodu, ktoré sa odlišujú počtom a typom konvertorov. Porovnateľnú funkciu má ale aj obvod výrobcu Texas Instruments TPS659037. Všeobecne sa tieto obvody označujú PMIC (z angl. - Power management integrated circuit) alebo PMU (z angl. - Power management unit). Sú príkladom použitia programovateľných funkcií pre konvertory. Zároveň sú jedny z mála architektúr, ktoré majú nezávislé paralelné vetvy. [21]

LTC3106 – Konvertor od spoločnosti „Linear Technologies“ využívajúci „Buck-Boost“ topológiu zo štyrmi spínačmi. To znamená, že obvod môže jedným zapojením zvyšovať aj znižovať vstupné napätie. Prívod napätia môže prichádzať z jedného z dvoch zdrojov, ktoré majú rôznu prioritu. Zamýšľané použitie je ako predlžovač životnosti batérií, vďaka primiešavaniu energie získanej z prostredia. Ak je prítomná batéria, tak je obvod schopný odoberať energiu zo zdroja s napätím už od 300mV (bez batérie je najnižšia hranica 850mV). Obvod obsahuje aj nabíjanie konštantným napätím, ktorého úroveň sa nastavuje digitálnou hodnotou na špeciálnych vývodoch. Na sekundárnej vetve teda môže byť jednorazová batéria s nízkym samovybíjaním alebo nabíjateľný akumulátor. Obvod umožňuje voľbu výstupného napätia, špičkového prúdu a bodu najvyššieho výkonu alternatívneho zdroja. Unikátnosť tohto obvodu spočíva v spomínanej možnosti výberu zdrojového napätia a súvislého prechodu medzi nimi [22].



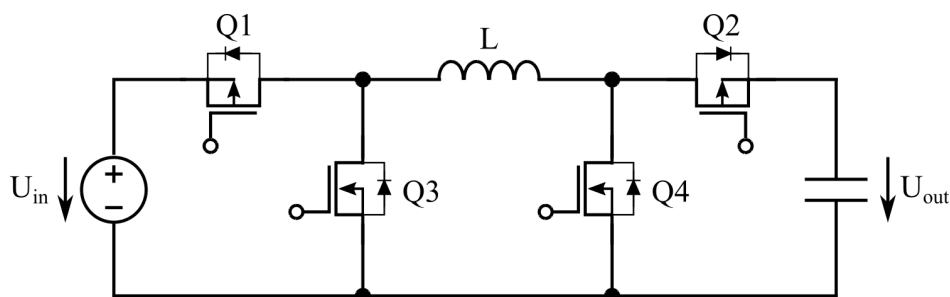
Obr. 4: Príklad aplikácie obvodu LTC3106, kde solárny panel predlžuje životnosť jednorazovej lítiovej batérie [22]

1.4 Model DC-DC konvertorov

Výhodnosť uvažovaného systému napájania je overená pomocou elektrotechnického modelu výkonovej straty energie na jednotlivých konvertoroch. Pre zamýšľanú funkciu je najlepšie, ak sú použité topológie konvertorov čo najrôznejšie, aby dosahovali najlepšiu efektivitu pri rôznych podmienkach. Z tohto dôvodu sú zvolené zapojenia spínaných konvertorov: s jednou indukčnosťou, s transformátorom, s dvoma indukčnosťami a kondenzátorom. Implementácie týchto zapojení sú zvolené tak, aby dokázali znižovať ale aj zvyšovať napätie a zároveň, aby polarita výstupného napätia bola totožná so vstupným napätím.

Buck-Boost

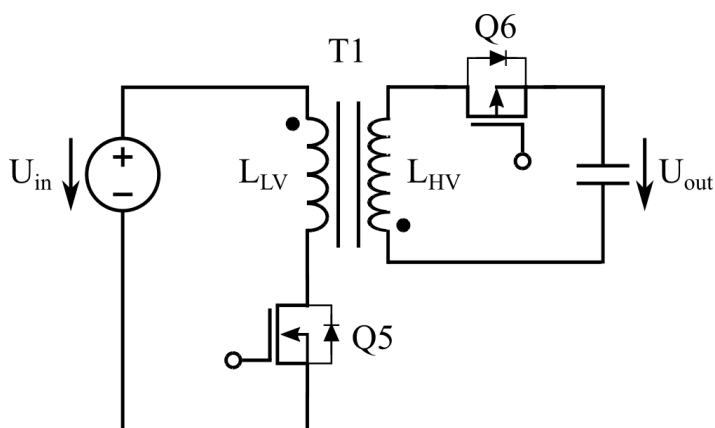
Jednoduchá topológia používajúca jeden indukčný prvok. V angličtine bežne nazývaný „4-switch Buck-Boost“ nakoľko má 4 spínacie prvky. Jediné z testovaných zapojení, ktoré je schopné prepúšťať vstupné napätie priamo na výstup bez nutnosti spínania [54] [55] [56].



Obr. 5: Schéma "Buck-Boost"konvertora zo štyrmi spínacími prvkami

Fly-back

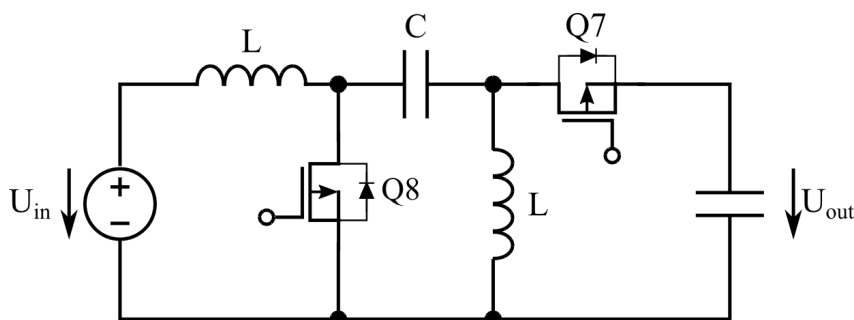
Zapojenie používajúce transformátor. Bežne implementované v zdrojoch a adaptéroch premenňajúcich 230V striedavých z elektrickej siete na nízke jednosmerné napätie pre stolný počítač, notebook či nabíjačku na smartfón. Hlavným dôvodom je izolácia vstupného a výstupného napätia, ktorú transformátor poskytuje [57].



Obr. 6: Schéma transformátorového "Fly-back"konvertora

Sepic (Zeta)

Komplikovanejšie zapojenie, ktoré používa dva indukčné prvky a jeden kondenzátor. Vyšší počet frekvenčne závislých prvkov môže komplikovať modelovanie, no taktiež môže byť výhodou z hľadiska diverzity zapojení. Tiež používané v obrátenej konfigurácii (t.j. vstup je výstup a naopak) pod názvom Zeta topológia [59] [60].



Obr. 7: Schéma "Sepic"konvertora

Model výkonovej straty každého zapojenia získame ako súčet strát na jednotlivých súčiastkach. Pri tvorbe tohto modelu je nevyhnutná istá miera zjednodušovania, nakoľko je bezchybný model komplikovaný. Disperzia výrobných vlastností komponentov, časová degradácia a mnohé iné javy zapríčiňujú, že výsledok ani absolútne presného modelu nemusí odpovedať realite. Model preto zohľadňuje nasledovné straty : vedenie prúdu cez parazitný odpor komponentov, spínanie brány tranzistorov, lineárny mód tranzistorov v spínanom cykle. Frekvencia spínania je zvolená z nízkeho rozsahu od 10kHz až 250kHz, aby bolo možné ignorovať frekvenčne závislé straty, ktorých hodnota je v tomto rozsahu malá. Menovite : strata na jadre indukčností, strata na spínaní parazitnej kapacity „drain-source“ tranzistorov a strata na parazitných vlastnostiach plošného spoja. Malý rozsah testovaných frekvencií tiež umožňuje zjednodušenie frekvenčne závislých vlastností na konštanty. Menovite : impedancia kondenzátora, indukčnosť a parazitné vlastnosti induktorov. Model predpokladá, že spínané tranzistory pracujú synchronne bez straty spôsobenej nedokonalým časovaním. Všetky zjednodušenia zapríčiňujú, že vytvorené modely sú orientačné a nie sú vhodné na priame riadenie [54] [55] [56] [57] [58] [59][60].

Model vyžaduje aj vlastnosti použitých súčiastok. Tie sú doplnené na základe priemerných hodnôt uvedených v katalógových listoch reálnych súčiastok uvedených v tabuľke 2. Pri transformátore boli tieto hodnoty odmerané priamo na súčiastke pri frekvencií 100kHz, nakoľko dokumentácia súčiastky neobsahovala potrebné informácie.

Výpočet výkonovej straty na konkrétnej súčiastke nie je univerzálny, ale závisí aj od úlohy, ktorú súčiastka spĺňa. To znamená, že strata na dvoch tranzistoroch môže vyžadovať iný výpočet ak sú v inom zapojení. Rovnice 1, 2, 3 zobrazujú modelom použitý výpočet, ktorý zahŕňa všetky spomínané zjednodušenia.

Tabuľka 2: Zoznam súčiastok použitých v modeli obvodu

Označenie súčiastky v schéme	Použitá súčiastka
Q1,Q2,Q6,Q7 (P-MOSFET)	IRLML9303TRPBF
Q3,Q4,Q5,Q8 (N-MOSFET)	IRLML6346TRPBF
L	SDN0530MT100
T1	TI-EF12.6-2300
C	R82DC3470DQ60J

Strata na tranzistore, ktorý je aktívne spínaný :

$$P_{LossQ1} = R_{DSQ1} \cdot I_{Q1}^2 + Q_{GQ1} \cdot V_{GQ1} \cdot f + 0.5 \cdot V_{IN} \cdot I_{Q1} \cdot \left(\frac{Q_{GQ1}}{I_{GQ1ON}} + \frac{Q_{GQ1}}{I_{GQ1OFF}} \right) \cdot f \quad [W] \quad (1)$$

Strata na tzv. synchronnom tranzistore, ktorý v asynchronnom zapojení môže byť nahradený diódou :

$$P_{LossQ2} = R_{DSQ2} \cdot I_{Q2}^2 + Q_{GQ2} \cdot V_{GQ2} \cdot f \quad [W] \quad (2)$$

Strata na vodivom prvku (t.j. induktor, kondenzátor, trvalo otvorený tranzistor) :

$$P_{LossL} = R_L \cdot I_L^2 \quad [W] \quad (3)$$

Ďalším dôležitým krokom pre získanie straty obvodu je výpočet prúdu, ktorý tečie jednotlivými komponentami. Konkrétne vyjadrenie prúdu tečúcim súčiastkou môže mať niekoľko foriem, no musí dávať rovnakú hodnotu. Tento model predpokladá známe hodnoty vstupného napätia, požadovaného výstupného napätia, potrebného výstupného prúdu a zvolenej spínanej frekvencie, čo je dostačujúce. Vo všeobecnosti k vyjadreniu treba poznať :

- Pracovný režim obvodu – Môže byť: **spojitý** – t.j. prúd v induktore medzi cyklami neklesne na nulu (angl. skratka „CCM“), **nespojité** – t.j. prúd klesne na nulu (angl. skratka „DCM“).
- Kritický prúd – hraničná hodnota výstupného prúdu, pri ktorej sa menia režimy. Ak je výstupný prúd väčší ako vypočítaný kritický prúd, tak obvod pracuje v spojitom režime. Ak je výstupný prúd menší tak pracuje v nespojitom režime.
- Striedu riadiaceho signálu – pomer času, keď prúd tečie danou vetvou, k času keď netečie. Postup určenia striedy na každom komponente je závislý od konkrétneho obvodu. Presný postup výpočtu použitých obvodov je popísaný v algoritmoch 1 až 3.

Niektoré zapojenia môžu vyžadovať aj iné špecifické vyjadrenia.

Výpočet Buck-Boost topológie je v algoritme 1. Oproti ostatným modelovaným topológiám si Buck-Boost vyžaduje odlišné riadenie v prípadoch zvyšovania a znižovania napätia. Reálne aplikácie majú aj tretí typ riadenia, ktorý sa používa, keď je vstupné a výstupné napätie relatívne podobné (hodnota rozsahu závisí od konkrétneho riešenia). Pre jednoduchosť modelov je toto riadenie zanedbané. V algoritme sú teda len dva typy výpočtov. Pre prípad znižovania napätia – ozn. Buck. A pre prípad zvyšovania napätia – ozn. Boost [54] [55] [56].

Algorithm 1 Calculation of Buck-Boost converter loss model

Require: V_i, V_o, I_o, f , Component Values

<pre> 1: if $V_i > V_o$ then ▷ Buck 2: $I_{CRIT} = 0.5 \cdot \frac{V_o \cdot (V_i - V_o)}{V_i \cdot L \cdot f}$ 3: if $I_o > I_{CRIT}$ then ▷ CCM 4: $D = \frac{V_o}{V_i}$ 5: $I_{Q1} = D \cdot I_o$ 6: $I_{Q3} = (1 - D) \cdot I_o$ 7: $I_L = I_o$ 8: else ▷ DCM 9: $D = \frac{8 \cdot L \cdot f \cdot \frac{I_o}{V_o}}{\sqrt{\left(\frac{2 \cdot V_i}{V_o} - 1\right)^2 - 1}}$ 10: $D2 = \frac{(V_i - V_o) \cdot D}{V_o}$ 11: $I_{Q1} = D \cdot I_o$ 12: $I_{Q3} = D2 \cdot I_o$ 13: $I_L = I_o$ 14: end if 15: $V_{GQ1} = V_i; \quad V_{GQ3} = 3.3$ 16: $V_{GQ2} = 0; \quad V_{GQ4} = 0$ 17: $I_{Q2} = I_L; \quad I_{Q4} = 0$ 18: $CTRL = 1$ 19: else if $V_i \leq V_o$ then ▷ Boost 20: $I_{CRIT} = \frac{(V_o - V_i) \cdot V_i^2}{2 \cdot f \cdot L \cdot V_o^2}$ 21: if $I_o > I_{CRIT}$ then ▷ CCM </pre>	<pre> 22: $D = 1 - \frac{V_i}{V_o}$ 23: $I_{Q4} = D \cdot \frac{I_o}{1 - D}$ 24: $I_{Q2} = (1 - D) \cdot \frac{I_o}{1 - D}$ 25: $I_L = \frac{I_o}{(1 - D)}$ 26: else ▷ DCM 27: $D = \frac{1}{V_i} \cdot \sqrt{I_o \cdot f \cdot 2 \cdot L \cdot (V_o - V_i)}$ 28: $D2 = \frac{V_i \cdot D}{V_o - V_i}$ 29: $I_{Q4} = D \cdot \frac{I_o}{D2}$ 30: $I_{Q2} = I_o$ 31: $I_L = I_o / D2$ 32: end if 33: $V_{GQ2} = V_o; \quad V_{GQ4} = 3.3$ 34: $V_{GQ1} = 0; \quad V_{GQ3} = 0$ 35: $I_{Q1} = I_L; \quad I_{Q3} = 0$ 36: $CTRL = 0$ 37: end if 38: $P_{Loss} = R_{Q1} \cdot I_{Q1}^2 + Q_{GQ1} \cdot V_{GQ1} \cdot f + 0.5 \cdot$ $V_i \cdot I_{Q1} \cdot \left(\frac{Q_{GQ1}}{I_{GQ1}} + \frac{Q_{GQ1}}{I_{GQ1}} \right) \cdot f \cdot CTRL + R_{Q2} \cdot$ $I_{Q2}^2 + Q_{GQ2} \cdot V_{GQ2} \cdot f + R_{Q3} \cdot I_{Q3}^2 + Q_{GQ3} \cdot$ $V_{GQ3} \cdot f + R_{Q4} \cdot I_{Q4}^2 + Q_{GQ4} \cdot V_{GQ4} \cdot f +$ $0.5 \cdot V_i \cdot I_{Q4} \cdot \left(\frac{Q_{GQ4}}{I_{GQ4}} + \frac{Q_{GQ4}}{I_{GQ4}} \right) \cdot f + R_L \cdot I_L^2$ </pre>
--	---

Algoritmus 2 opisuje výpočet Zeta topológie [60]. Mimo základných krokov výpočtu vyžaduje hodnotu celkovej indukčnosti vypočítanú z hodnôt dvoch súčiastok. V algoritme 3 je výpočet Fly-back topológie, ktorá má v tomto vyjadrení neštandardný len postup výpočtu [57] [58].

Algorithm 2 Calculation of Zeta converter loss model**Require:** V_i, V_o, I_o, f , Component Values

```

1:  $L = \frac{L1 \cdot L2}{L1 + L2}$ 
2:  $I_{CRIT} = \frac{V_o \cdot \left(1 - \frac{V_o}{V_i + V_o}\right)^2}{2 \cdot L \cdot f}$ 
3: if  $I_o > I_{CRIT}$  then ▷ CCM
4:    $D = \frac{V_o}{V_i + V_o}$ 
5:    $I_{Q7} = \frac{V_o \cdot D^2}{V_i \cdot (1 - D)^2}$  |  $I_{Q8} = \frac{V_i \cdot D}{V_o \cdot (1 - D)}$ 
6:    $I_{L1} = \frac{D \cdot V_i \cdot I_o}{V_o} \cdot \left( \frac{D}{(1 - D)^2} - \frac{1}{2 \cdot L1 \cdot f \cdot I_o} \right)$ 
7:    $I_{L2} = I_o$ 
8: else ▷ DCM
9:    $D2 = \sqrt{\frac{2 \cdot L \cdot f \cdot I_o}{V_o}}$ 
10:   $D = \frac{V_o \cdot D2}{V_i}$ 
11:   $I_{Q7} = \frac{V_i \cdot I_o \cdot \left(\frac{D}{D2}\right)^2}{V_o}$  |  $I_{Q8} = \frac{V_i \cdot I_o \cdot \frac{D}{D2}}{V_o}$ 
12:   $I_{L1} = \frac{D \cdot V_i \cdot I_o}{V_o} \cdot \left( \frac{D}{2 \cdot L2 \cdot f \cdot I_o} - \frac{D2}{2 \cdot L1 \cdot f \cdot I_o} \right)$ 
13:   $I_{L2} = I_{L1}$ 
14: end if
15:  $I_C = I_o \cdot \sqrt{\frac{V_o}{V_i}}$ 
16:  $P_{Loss} = R_{Q7} \cdot I_{Q7}^2 + Q_{GQ7} \cdot V_{GQ7} \cdot f + 0.5 \cdot (V_i + V_o) \cdot I_{Q7} \cdot \left( \frac{Q_{GQ7}}{I_{GQ7}} + \frac{Q_{GQ7}}{I_{GQ7}} \right) \cdot f + R_{Q8} \cdot I_{Q8}^2 + Q_{GQ8} \cdot V_{GQ8} \cdot f + R_C \cdot I_C^2 + R_{L1} \cdot I_{L1}^2 + R_{L2} \cdot I_{L2}^2$ 

```

Algorithm 3 Calculation of Fly-back converter loss model**Require:** V_i, V_o, I_o, f , Component Values

```

1:  $D = \frac{V_o}{V_o + V_i \cdot \frac{N_p}{N_s}}$ 
2:  $I_{CRIT} = \frac{V_i^2 \cdot D^2}{2 \cdot L_p \cdot f \cdot V_o}$ 
3:  $I_{delta} = 0.6 \cdot \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot D}$ 
4: if  $I_o > I_{CRIT}$  then ▷ CCM
5:    $I_{Q5} = \sqrt{D \cdot \left( \left( \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot D} \right)^2 + \frac{I_{delta}^2}{3} \right)}$ 
6:    $I_{Q6} = \sqrt{(1 - D) \cdot \left( \frac{\left( I_{delta} + \frac{N_p}{N_s} \right)^2}{3} + I_o^2 \right)}$ 
7: else ▷ DCM
8:    $D = \sqrt{\frac{2 \cdot I_o \cdot V_o \cdot L_p \cdot f}{V_i^2}}$ 
9:    $I_{delta} = 0.6 \cdot \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot D}$ 
10:   $I_{Q5} = \sqrt{D \cdot \left( \left( \frac{V_o \cdot I_o}{V_i \cdot D} \right)^2 + \frac{I_{delta}^2}{3} \right)}$ 
11:   $I_{Q6} = \sqrt{(1 - D) \cdot \left( \frac{\left( I_{delta} + \frac{N_p}{N_s} \right)^2}{3} + I_o^2 \right)}$ 
12: end if
13:  $I_{Lp} = I_{Q5}$ 
14:  $I_{Ls} = I_{Q6}$ 
15:  $P_{Loss} = R_{Q5} \cdot I_{Q5}^2 + Q_{GQ5} \cdot V_{GQ5} \cdot f + 0.5 \cdot V_i \cdot I_{Q5} \cdot \left( \frac{Q_{GQ5}}{I_{GQ5}} + \frac{Q_{GQ5}}{I_{GQ5}} \right) \cdot f + R_{Q6} \cdot I_{Q6}^2 + Q_{GQ6} \cdot V_{GQ6} \cdot f + R_{Lp} \cdot I_{Lp}^2 + R_{Ls} \cdot I_{Ls}^2$ 

```

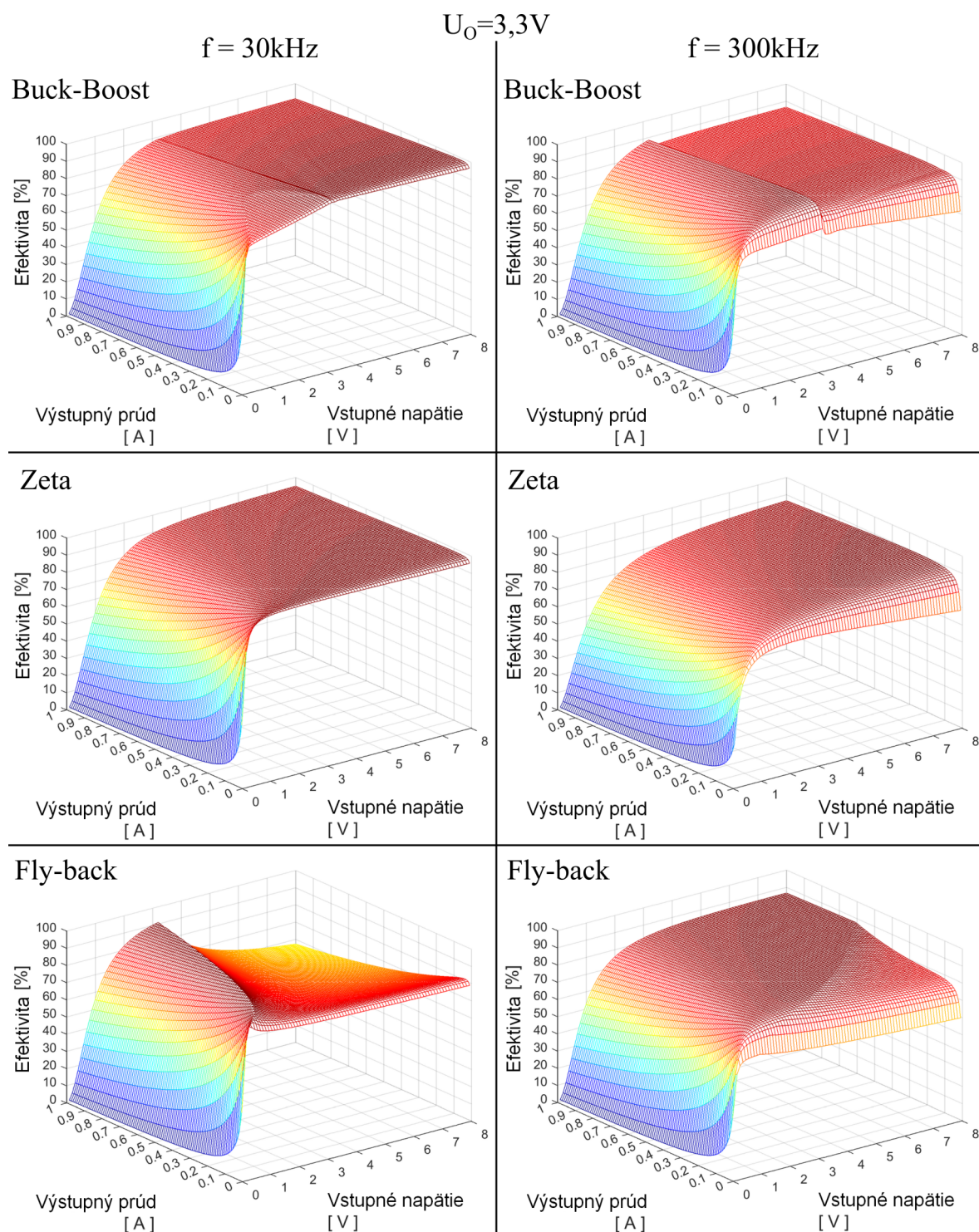
V tomto bode sú zadefinované všetky informácie na zostavenie priestorov opisujúcich výkonové straty jednotlivých topológií. Pre zrozumiteľnejšiu grafickú reprezentáciu sú vypočítané priestory strát prevedené na priestory efektivity na základe nasledovného vzťahu.

$$\left. \begin{array}{l} P_L = P_I - P_O \\ \eta = \frac{P_O}{P_I} \end{array} \right\} \rightarrow P_L + P_O = \frac{P_O}{\eta} \rightarrow \eta = \frac{P_O}{P_L + P_O} \rightarrow \quad (4)$$

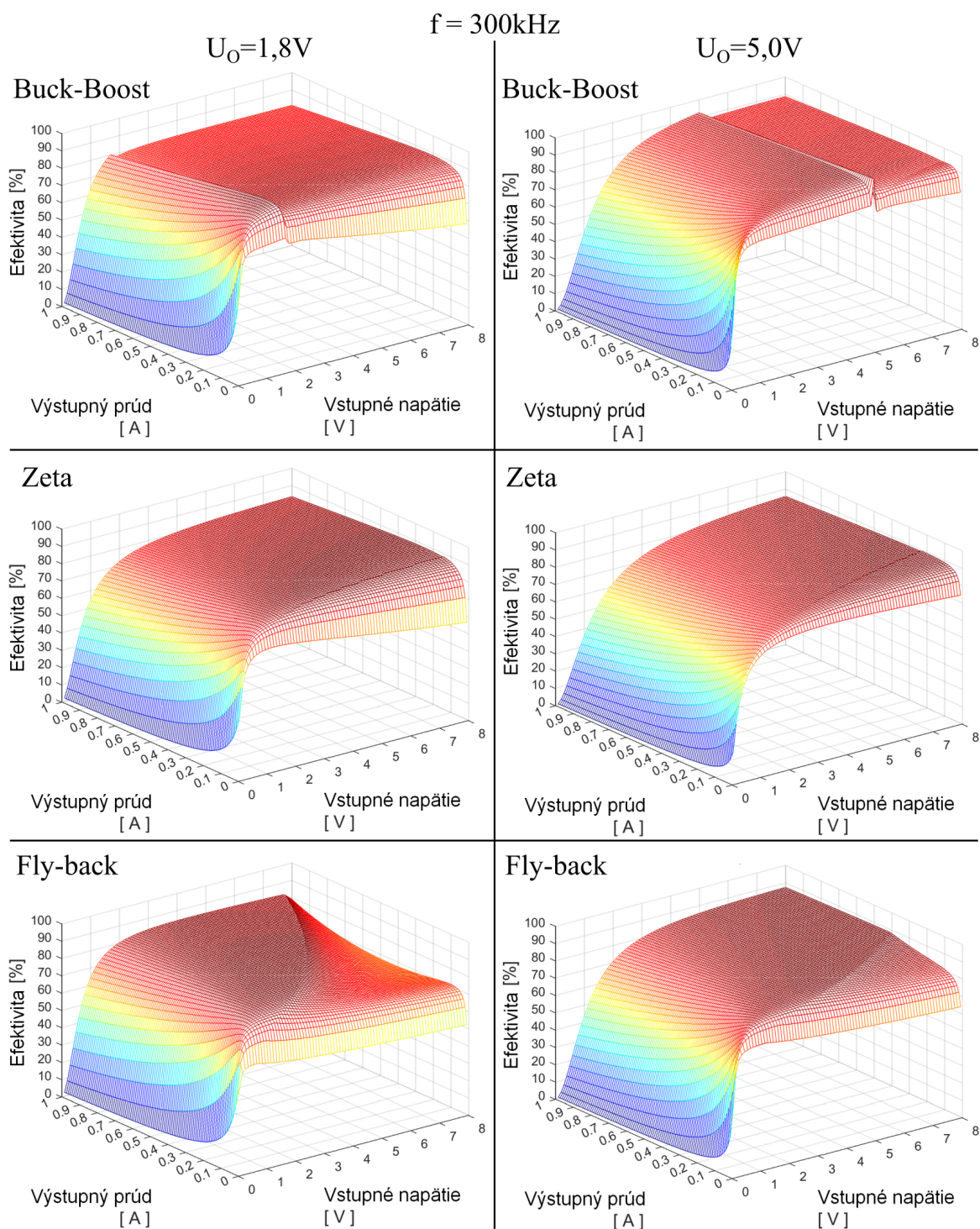
$$\rightarrow \eta = \frac{V_O \cdot I_O}{P_{Loss} + V_O \cdot I_O}$$

Obrázok 8 zobrazuje vypočítané priestory pri zvolenom výstupnom napätí 3,3V a dvoch rôznych spínacích frekvenciách 30kHz a 300kHz. Na priestoroch vidieť silnú frekvenčnú závislosť Fly-back topológie. Jej „hrebeň“ vysokej efektivity mení svoj tvar a polohu na základe spínacej frekvencie. Operačné podmienky na vrchole tohto hrebeňa predstavujú hranicu medzi spojitým a nespojitým pracovným režimom (tzv. kritický režim - „Critical Conduction Mode“) a sú bežne považované za výhodné [58]. Buck-boost topológia má taktiež menej výrazný hrebeň vysokej efektivity v miestach, kde je vstupné a výstupné napätie podobné. Z testovaných topológií je toto zapojenie jediné, ktoré dokáže „prepúšťať“ prúd zo vstupného napätia na výstup bez spínania. Podmienky, pri ktorých je operácia bez spínania možná, sú pre túto topológiu najvýhodnejšie. Navyše je pokles efektivity tejto topológie s rastúcou frekvenciou najmenší. Dôvodom môže byť len jeden prvok s frekvenčne závislými vlastnosťami – cievka. Tento jav sa nevýhodne prejavuje aj pri Zeta topológii s tromi takýmito prvkami. Jej priestor je síce hladký priestor bez výrazných extrémov, no s nárastom frekvencie stráca efektivitu najrýchlejšie.

Hodnota energetickej účinnosti zobrazená v priestoroch nezohľadňuje vlastnú spotrebu riadiaceho prvku.



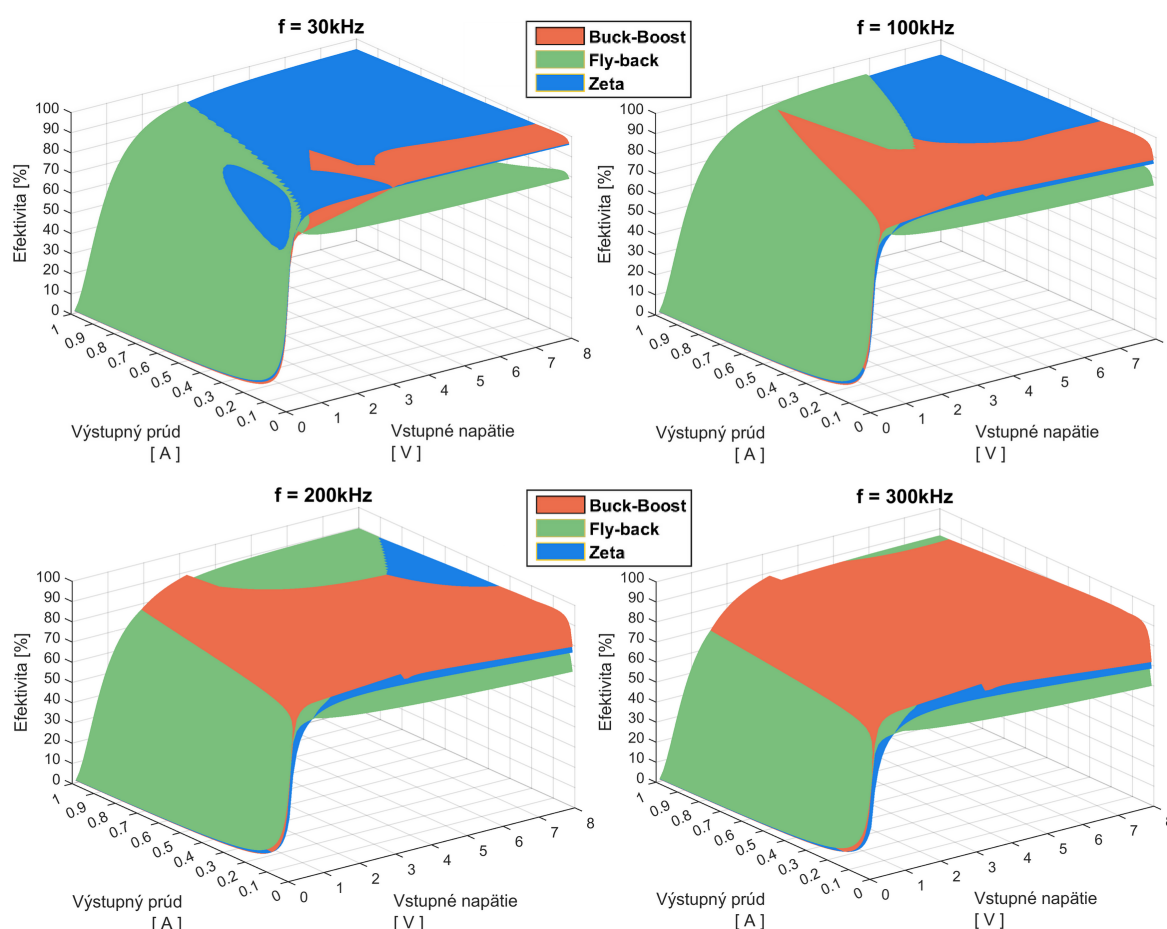
Obr. 8: Modelmi vypočítané priestory efektivity každého zapojenia s výstupným napätím 3,3V



Obr. 9: Modelmi vypočítané priestory efektivity každého zapojenia so spínacou frekvenciou 300kHz

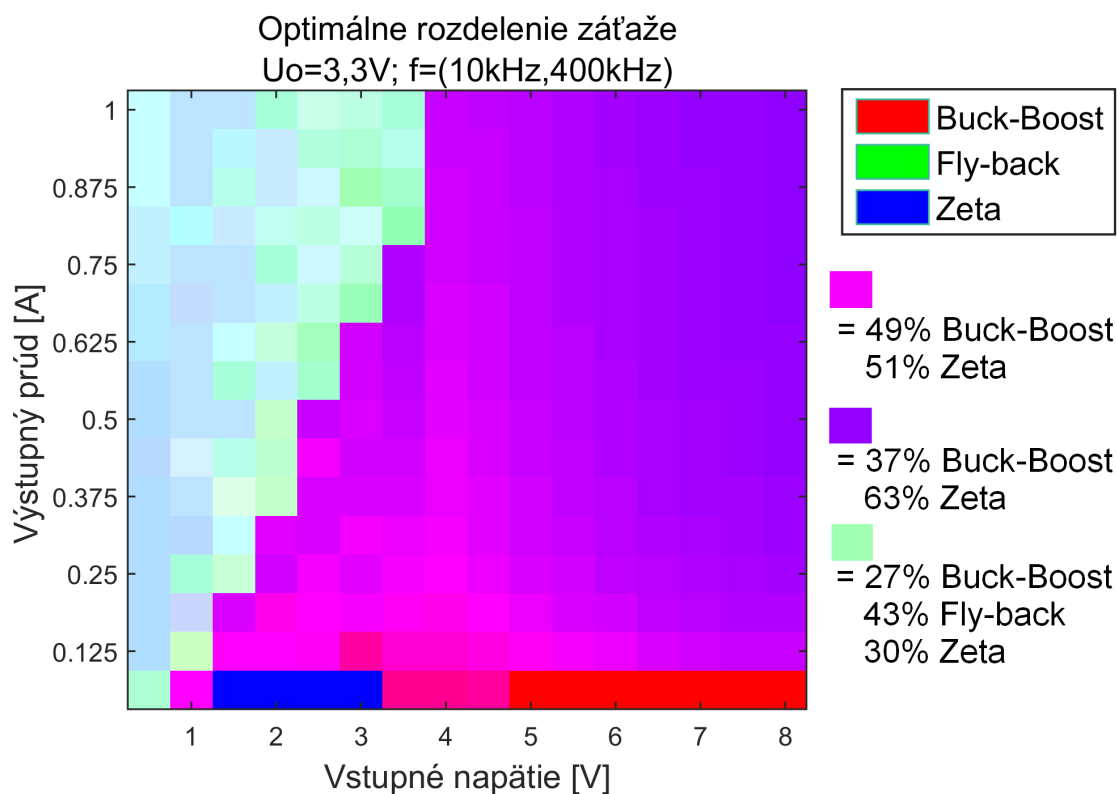
Obrázok 9 obsahuje vypočítané priestory pri dvoch rôznych úrovniach výstupného napätia. V priestoroch vidieť nezanedbateľnú závislosť efektivity aj od výstupného napätia. Priestory s nízkym výstupným napätím majú vyššiu efektivitu pri nízkom vstupnom napätí ako priestory s vysokým výstupným napätím pri nízkom vstupnom napätí. Rovnako priestory s vysokým výstupným napätím majú vyššiu efektivitu pri vysokom vstupnom napätí ako priestory s nízkym výstupným napätím pri vysokom vstupnom napätí. Čo jednoduchšie povedané znamená, že zapojenia majú tým vyššiu efektivitu, čím menšiu napäťovú zmenu prekonávajú. V priestoroch buck-boost a fly-back topológiách taktiež dochádza k posunu hrebeňov vysokých efektív.

Vzájomné porovnanie týchto priestorov je znázornené v obrázku 10 pri štyroch rôznych frekvenciách. Tieto priestory ukazujú, že aj frekvencia má podstatný vplyv na efektivitu. Pri nízkej frekvencii je vo väčšine prípadov najvýhodnejšia Zeta topológia a s narastajúcou frekvenciou ju postupne nahradzuje buck-boost topológia. Fly-back topológia je stabilne najvýhodnejšia v oblasti nízkeho vstupného napätia.



Obr. 10: Prekrytie vypočítaných priestorov pri výstupnom napätí 3,3V a rôznych frekvenciách

Ako teda najvýhodnejšie použiť konvertor skladajúci sa z paralelného zapojenia týchto troch topológií? Odpoveď je v obrázku 11, ktorý zobrazuje optimálne rozdelenie záťaže pri rôznych hodnotách vstupného napätia a výstupného prúdu. Požadované výstupné napätie je zvolené na 3,3V. Frekvencia je pre každý dátový bod a každú topológiu zvolená individuálne tak, aby topológia tvorila čo najmenšiu stratu. Dátové body v obrázku tvoria farebné pixele. Farba týchto pixelov zobrazuje pomer, ktorým sa požadovaný výstupný prúd rozdeľuje medzi paralelné vetvy. Pomer červenej, zelenej a modrej zložky pixela je menený, aby zodpovedal vypočítaným dátam. Legenda v rámečku zobrazuje väzbu základnej farby k istej topológii. Pod ňou sú príklady ako chápať jednotlivé farby. Napríklad fialová farba sa skladá z modrej a červenej. Zobrazuje teda oblasť, kde fly-back topológia nie je vôbec aktívna. Takto je možné zobrazit' charakter viacrozmerných dát na papier. Z obrázku teda vidieť, že pri nízkom vstupnom napätí je výhodná hlavne zeta topológia, ku ktorej sa s rastúcim napätím pridáva fly-back alebo buck-boost, v závislosti od výstupného prúdu. Existuje však aj ostrá hranica, za ktorou operácia fly-back topológie už nie je vôbec výhodná.



Obr. 11: Mapa zobrazujúca rozloženie záťaže vytvárajúce najmenšiu výkonovú stratu pri rôznych podmienkach

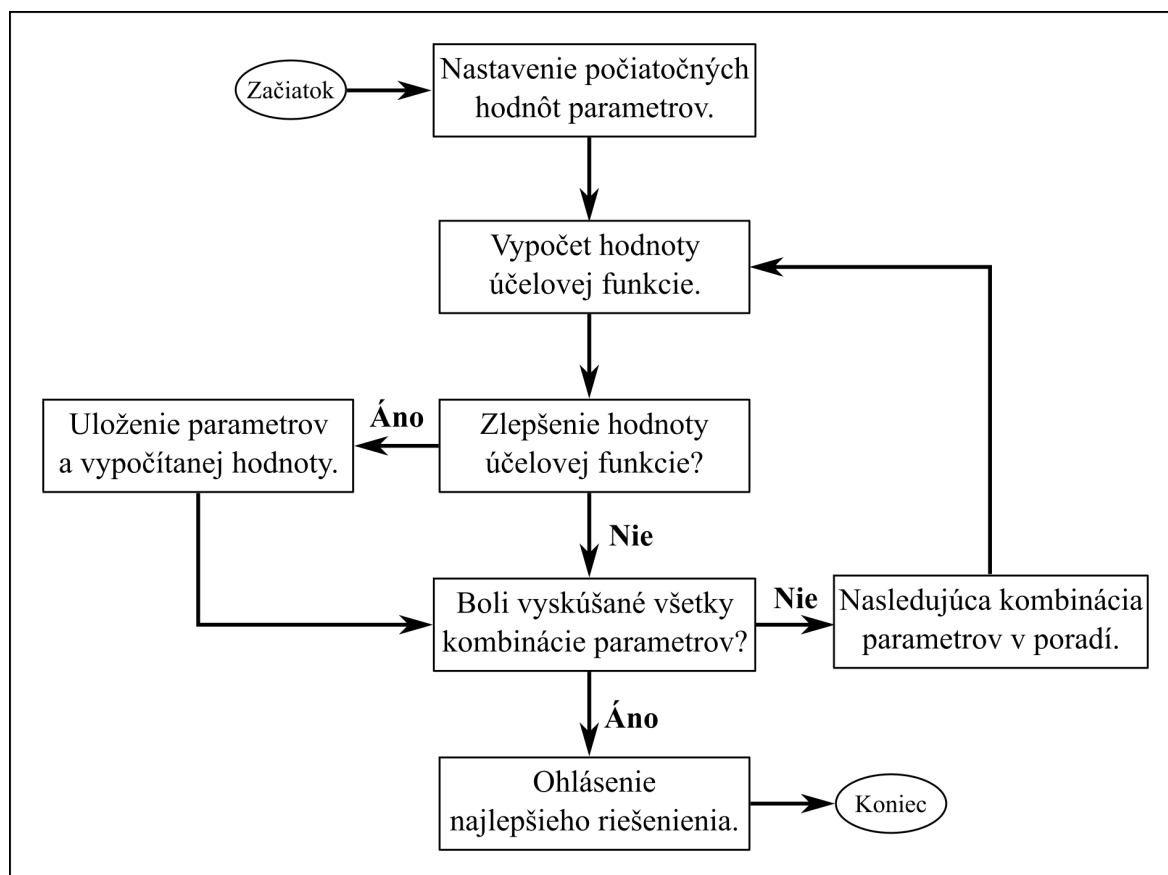
1.5 Optimalizácia s nízkym výpočtovým výkonom

Hľadanie výhodných riešení v priestoroch vytvorených modelmi či meraniami môže byť výpočtovo náročné. V tejto podkapitole sú zadefinované optimalizačné metódy použité pri týchto výpočtoch. Optimalizačné metódy môžu byť prispôsobené istému účelu, (presnosť, čas výpočtu, pamäťová náročnosť ...) pričom si tieto účely môžu odporovať. Vhodnosť metódy rovnako ovplyvňuje aj konkrétna aplikácia. Voľba výhodnej metódy je kvôli týmto komplikáciám zložitejšia.

Optimalizáciu zamýšľanej aplikácie je možné poňať dvoma spôsobmi. Prvým je riešiť celý problém „offline“ na počítači s vysokým výpočtovým výkonom na základe modelu alebo nameraných dát. Druhým je hľadať aspoň čiastočné zlepšenie v samotnom zariadení „online“ za jeho behu z aktuálnych dát. Rozdelenie optimalizácie na počítač s vysokým a nízkym výpočtovým výkonom umožňuje prispôbenie optimalizačného algoritmu dostupným prostriedkom. Výkonný počítač má potenciál nájsť globálne maximum, čo závisí od veľkosti prehl'adávaného priestoru. Jeho veľkosť je možné upraviť zmenou rozlíšenia v kvantizácii veličín (napätia a prúdy), čo v istom rozsahu nemusí byť kritický problém. Nevýhodou tohto riešenia je slabá korelácia k realite. Ak výpočet vychádza z modelových dát, tak presnosť výsledku je obmedzená presnosťou modelu, ktorý nedokáže zachytiť všetky vplyvy. No presnosť nezaručujú ani namerané dáta, pretože vlastnosti zariadenia sú z dlhodobého hľadiska dynamické. Napriek tomu je presnosť dosiahnuteľná týmto spôsobom dostačujúca pre odhad, kde sa nachádza optimum. Kontrastne k tejto metóde je možné počítať optimalizáciu aj v samotnom zariadení na úspornom mikrokontroléri. Operačná pamäť takéhoto obvodu je obmedzená na niekoľko desiatok kilobajtov a frekvencia procesora je bežne pod 100MHz. Dostupné prostriedky neumožňujú výpočtu používať celý priestor a teda nájdenie globálneho optima je nepravdepodobné. Pre algoritmus je namiesto toho výhodne sústrediť sa na aktuálny stav systému a hľadať zlepšenia od neho. Výpočet v takýchto podmienkach môže byť užitočný z dôvodu adaptivity na nepredvídateľné podmienky (starnutie/poškodenie súčiastok, vplyv zanedbanej veličiny – napr. teplota, atď.). Z hľadiska dosiahnutia čo najlepšej hodnoty účelovej funkcie v reálnom zariadení je výhodné skombinovať oba spôsoby. Algoritmus bežiaci v mikrokontroléri by tak mohol od výkonného počítača vedieť, v ktorej oblasti sa nachádza optimum, a následne prehl'adávať len túto redukovanú oblasť z reálnych dát. Užitočné môže byť aj ladenie mikrokontrolérového algoritmu na modeloch vo výkonnom počítači, čím sa úsporný algoritmus môže prispôbiť charakteru vstupných dát. Môže prísť na um aj vynechanie výpočtu v mikrokontroléri, pričom by namiesto toho odosielať dáta do výkonnejšieho počítača na spracovanie. Pre aplikácie získavajúce energiu je takýto spôsob pravdepodobne nevýhodný, nakoľko je výpočet mikrokontroléra menej energeticky náročný než odosielanie nemalého množstva dát. Presný verdikt však závisí na konkrétnej implementácii (úspešnosť optimalizácie, typ dátovej linky a iné).

Exaktná metóda – „brute force“

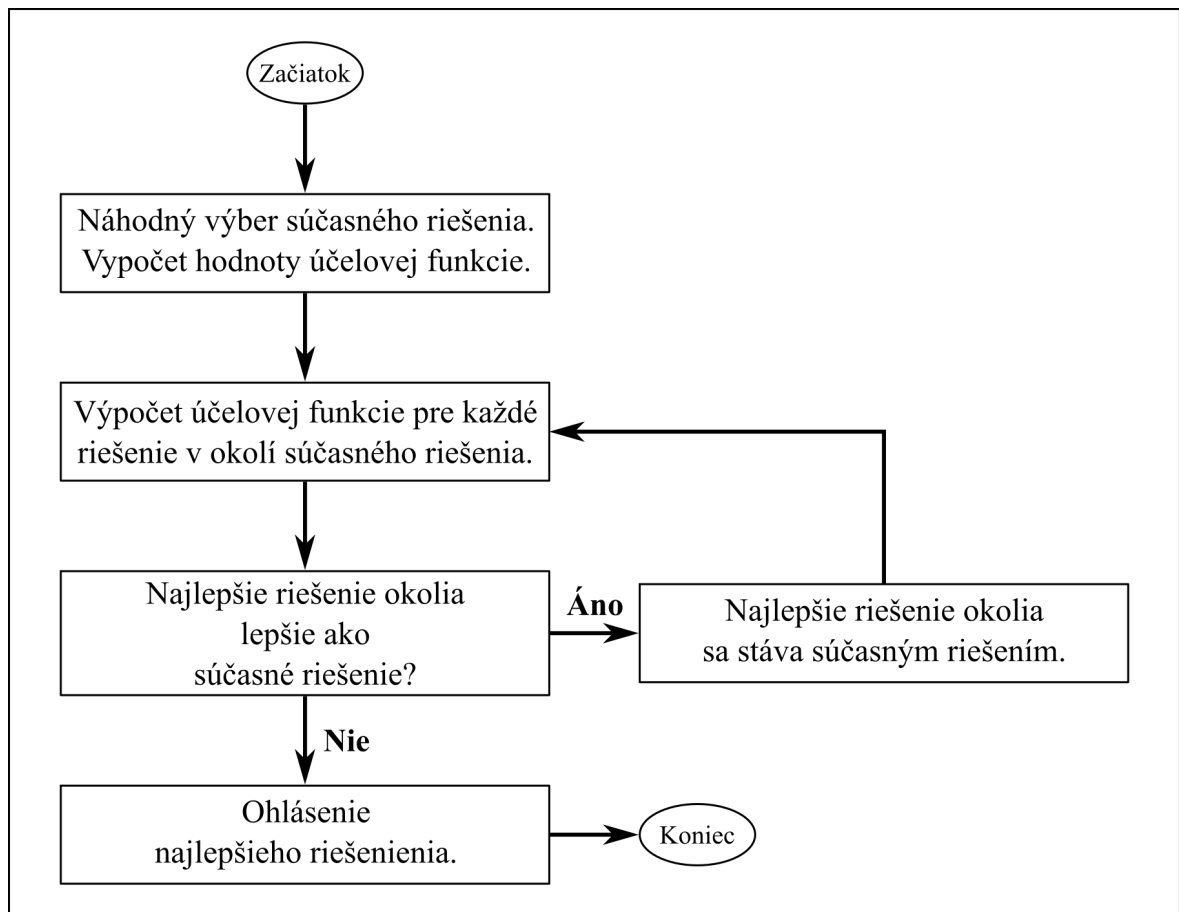
Jedným spôsobom ako v priestore riešení nájsť optimum je vyskúšať všetky možnosti. Práve takto funguje tzv. „brute force“ metóda. Súčasne však predstavuje výpočtovo najnáročnejšiu možnosť. Výsledky tejto metódy budú preto použité ako referencia času a presnosti.



Obr. 12: Diagram priebehu "brute force" algoritmu

Hill climbing

Výpočtovo nenáročná metóda vychádzajúca z gradientovej optimalizácie. Základná gradientová metóda používa derivácie funkcie na posun k lepšiemu riešeniu. V súčasnosti existujú jej mnohé variácie pridávajúce napríklad hybnosť, čo umožňuje preskočiť (či skôr preliezť) krátke úseky s horšou účelovou funkciou, a tak zlepšiť optimalizáciu napr. v zašumenom priestore. V našom prípade ide o priestor diskretných hodnôt, ktorý pravdepodobne nie je možné presne popísať funkciou. Použijeme preto upravenú formu metódy bežne nazývanej „hill climbing“, kde namiesto derivácií je vyhodnocované najbližšie okolie aktuálneho riešenia. V našom prípade za najbližšie okolie považujeme body dosiahnuteľné po zmene súradníc najmenším krokom (t.j. pripočítanie/odpočítanie rozlíšenia od jednej alebo viacerých súradníc). Metóda sa posunie na lepšie riešenie až po preskúmaní celého okolia – čiže nie je „greedy“. Pri experimentoch boli, za účelom potlačenia vplyvu šumu, použité modifikácie zväčšujúce okolie [66].



Obr. 13: Diagram priebehu základného "hill climbing" algoritmu

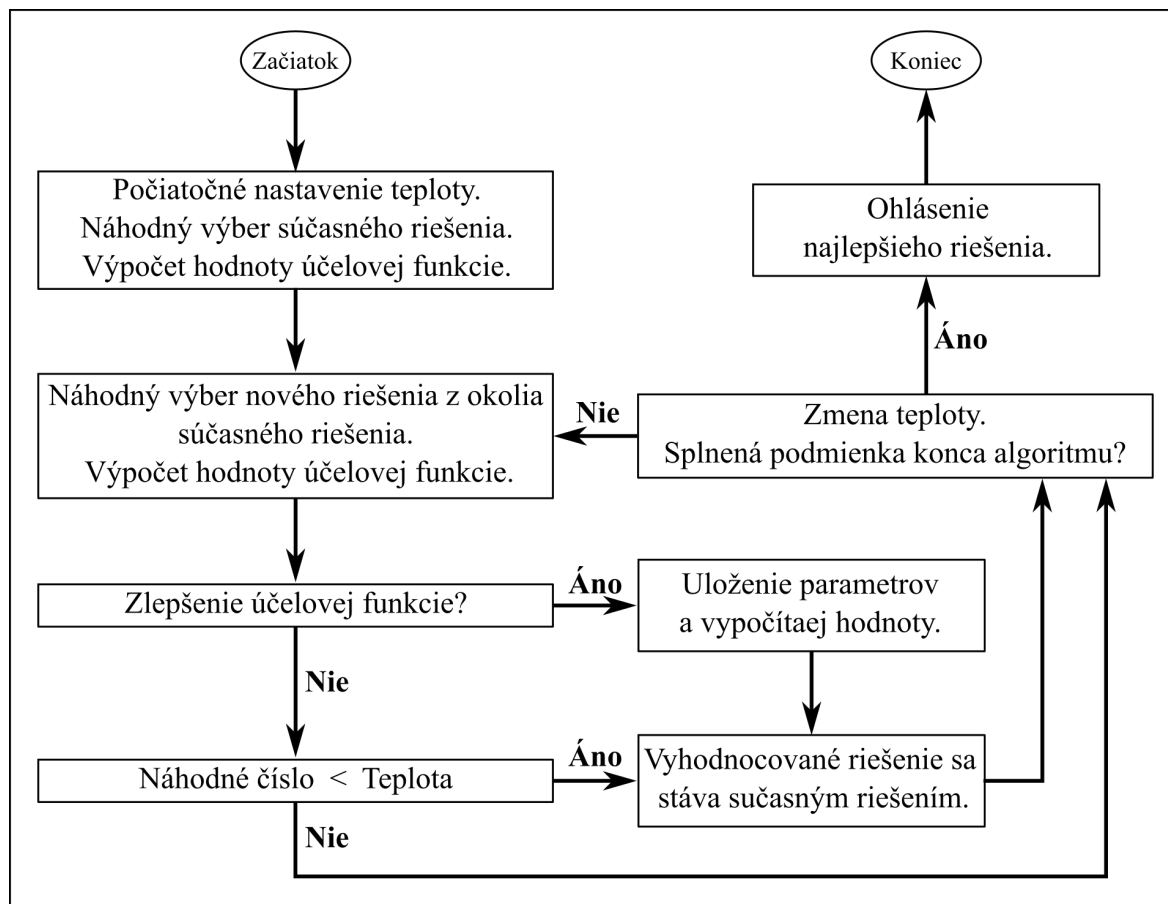
Coordinate descent

Taktiež nenáročná metóda, ktorá preskúmava priestor po jednotlivých rozmeroch. Princípalne je podobná „hill climbing-u“ s tým rozdielom, že za okolie považuje riešenia, v ktorých sa mení jeden parameter v celom rozsahu. Po vyhodnotení okolia sa prejde na najlepšiu hodnotu, zmení sa výber rozmeru/parametra a pokračuje sa odznova prehľadávaním nového okolia. Tejto metóde je možné jednoducho znížiť výpočtovú náročnosť jednoduchým podvzorkovaním okolia. Metóda teda nebude vyhodnocovať každý prvok v danom rozmere ale len každý „n“-tý. Alternatívne môže byť zvolený fixný počet prvkov, ktoré budú vo vybranom rozmere vyhodnocované [35] [67] [68].

Simulated annealing

Názov má slovenský ekvivalent “simulované žihanie”. Často používaná metóda, ktorá má menšiu šancu skončiť v lokálnom extréme. Metóda vyhodnocuje okolie aktuálneho riešenia v náhodnom poradí. V prípade, že nájde lepšie riešenie prejde k nemu okamžite a následne začína nová iterácia prehľadávania okolia. V prípade, že vyhodnocovaný bod neposkytuje lepšiu účelovú funkciu algoritmus naň prejde len s istou šancou. Táto šanca, bežne prezývaná „teplota“, je na začiatku algoritmu typicky nastavená na vysokú hodnotu – t.j. prehľadávaný bod často cestuje s malým ohľadom na účelovú funkciu. Postupom iterácií teplota klesá,

tzv. „chladnutie“, čo sa prejavuje menej častými nevýhodnými prechodmi. Po dosiahnutí nuly je prehľadávanie okolia podobné s „hill climbing“ metódou. Výnimkou je len „greedy“ prístup. Pri celkovom porovnaní týchto dvoch metód simulované žíhanie dovoľuje opustiť lokálne extrém. Implementácie tejto metódy sa môžu líšiť funkciou chladnutia, definíciou okolia alebo môžu opätovne zvýšiť teplotu či skočiť na náhodné miesto v celom priestore [69] [70].



Obr. 14: Diagram priebehu základnej podoby algoritmu simulovaného žíhania

Ostatné algoritmy

Na optimalizáciu priestoru radiacích veličín je možné použiť nespočetné množstvo ďalších metód. Za spomenutie stojí „Tabu search“, čo je ďalšia technika prehľadájúca priestor. Na rozdiel od ostatných si však zaznamenáva navštívené riešenia, aby sa im v budúcnosti dokázala vyhnúť. To môže byť výhodné, ak je riešenie uviaznuté v lokálnom extréme a snaží sa ho opustiť. Nevýhodou tejto metódy je vysoká pamäťová náročnosť na záznam „cesty“. Ďalšiu skupinu zaujímavých optimalizácií tvoria „evolučné algoritmy“. Ich podstatou je napodobenie prenosu génov v populácii, čo sa do matematiky preniesie ako kombinácia častí rôznych riešení, ich následná mutácia a opätovné kombinovanie. Tento prístup je výhodný pre rozsiahle systémy. Jednotlivé riešenia totiž môžu obsahovať časti s výhodou účelovou funkciou, no aj iné časti, ktoré celkový výsledok pokazia. Riešenia, ktoré majú dobré hod-

noty v odlišných častiach, si ich pomocou genetického algoritmu môžu vymeniť, čím vytvoria riešenie s lepšou celkovou hodnotou účelovej funkcie. Nevýhodou evolučných algoritmov je ich relatívne vysoká výpočtová náročnosť [71] [72].

Porovnanie vhodnosti metód na modeloch

Keďže sú k dispozícii priestory riešení vytvorené modelmi, je na nich možné otestovať vlastnosti opísaných optimalizačných metód. Výpočtom na výkonnom počítači budú odmerané ich dve kľúčové vlastnosti - čas výpočtu, odchýlka od optimálnej straty. K testovaniu bude použitý model systému s jedným zdrojom a jednou záťažou, ktoré spájajú tri heterogénne paralelné vetvy. Vetvy obsahujú konvertory modelovaných topológií buck-boost, fly-back, zeta. Pre orientačné porovnanie vhodnosti optimalizačných metód nie je dôležitý absolútny čas výpočtu, nakoľko záleží od výkonu konkrétneho počítača. Pre potlačenie tejto závislosti bude čas výpočtu zaznamenávaný relatívne k času výpočtu "brute force" metódy. Testovaním na niekoľkých (3) počítačoch s odlišnými hardvérovými prostriedkami bolo potvrdené, že zmena výpočtového výkonu počítača nespôsobuje podstatnú odchýlku pomerov trvania výpočtov testovaných metód k brute force metóde. Tabuľka 3 obsahuje namerané dáta. Uvedená hodnota odchýlky je vypočítaná ako rozdiel súčtu hodnôt jednotlivých bodov priestoru vypočítaného testovanou metódou so súčtom bodov optimálneho priestoru vypočítaného s brute force metódou.

Tabuľka 3: Porovnanie času výpočtu modelového priestoru rôznymi metódami

Metóda	Relatívny čas výpočtu	Relatívna odchýlka
Brute force	100%	0
Hill climbing	5.9%	7
Coordinate descent	5.1%	19
Simulované žíhanie	$12\% \pm 1.5\%$	41 ± 1

Z tabuľky vidieť najlepší pomer času výpočtu k odchýlke pri hill climbing metóde. Tento výsledok bolo možné predpokladať, nakoľko sú vypočítané priestory pomerne hladké a bez šumu. Bez väčšieho množstva lokálnych extrémov je chaotický pohyb simulovaného žíhania plytvaním času, čo tabuľka potvrdzuje. Metóda coordinate descent je síce rýchla, no korelácia riadiacich veličín spôsobuje jej značnú odchýlku. (Pre dodržanie konštantného výstupného výkonu je pri zmenšení istej riadiacej veličiny nutné zvýšiť inú, čo je pre metódu meniacu len jednu veličinu zároveň prekážka.) Výhodnosť metód môže byť pri výpočte na reálnych dátach vplyvom šumu mierne odlišná. Netreba taktiež zabúdať, že aktuálna výhodnosť metód je viazaná na konkrétnu podobu systému. Jeho zmeny môžu spôsobiť podstatnú zmenu výhodnosti metód.

Heterogénny paralelný systém správy napájania

Navrhovaným zlepšením existujúcich systémov napájania je použitie paralelného systému s heterogénnymi vetvami. Takéto zapojenie je užitočné v dvoch smeroch. Prvým z nich je priame zvýšenie energetickej účinnosti konverzie, vďaka schopnosti prispôsobenia sa operačným podmienkam – výber konvertora s najväčšou efektivitou v daných podmienkach. Reálne zapojenie však nemá obmedzenie na jeden aktívny konvertor, ale môže záťaž rozdeliť medzi viacero konvertorov. Prispôbovanie sa podmienkam teda bude mať formu zmeny rozloženia záťaže. Druhou dôležitou výhodou heterogénneho paralelného systému je možnosť spojenia rozličných zdrojov energie na napájanie jednej či viacerých záťaží riadeným spôsobom. Užitočným príkladom je zmiešavanie energie zo solárneho panelu do spotrebiča napájaného aj z vysokonapäťovej elektrickej siete. Pre súčasné obvody je problém využívať zdroje, ktoré nie sú schopné dodať všetok výkon požadovaný záťažou [26] [27] [40] [41]. Samotná vysoko-napäťová elektrická sieť je príkladom kombinácie mnohých zdrojov k jednému účelu. Jej riadenie ale vyžaduje centrálu plnú ľudí a počítačov s množstvom dát a predikcií. Riešenia pre menšie a jednoduchšie systémy jednosmerného napätia v súčasnosti nie sú rozšírené. Heterogénny paralelný systém sa dá nájsť aj mimo sveta elektrických javov, napríklad v delbe ľudskej práce, ekonomike či doprave.

2.1 Návrh riadenia

V tejto podkapitole sú priblížené vlastnosti a princípy riadenia heterogénneho paralelného systému správy napájania.

2.1.1 Spôsoby vyrovnávania záťaže

Základným problémom riadenia mnohých heterogénnych paralelných systémov je voľba záťaže pre každú vetvu. V súčasnosti takéto systémy predstavujú najmä počítačové siete a výpočtové strediská. V oboch prípadoch je vyrovnávanie záťaže prispôbované špecifickým podmienkam aplikácie. Používané algoritmy sa často sústreďujú na výpočtovú jednoduchosť a z toho plynúcu stabilitu [36] [38]. Napríklad :

- Kľúčová vlastnosť – Úlohy sú rozdelené podľa hodnoty istej „kľúčovej vlastnosti“. Napríklad rýchlosť prenosu, rýchlosť odozvy, vzdialenosť, zaťaženie procesora, dostupná pamäť, počet zlyhaní a podobne.
- „Cyklická obsluha“ – (z angl. „Round robin“) Algoritmus priradzuje úlohy vetvám/zariadeniam postupne. To znamená, že prvé zariadenie dostane jednu úlohu, nasledovné zariadenie dostane tiež jednu úlohu. Takto to dôjde po posledné zariadenie a následne sa pokračuje prvým. Metóda má mnoho modifikácií, upravujúcich záťaž vybraných zariadení.

Tieto algoritmy môžu byť aplikované staticky alebo dynamicky. Staticky znamená, že výhodnosť vetiev je definovaná pred začiatkom úlohy/operácie a počas behu sa nemení. Pri dynamickej implementácii sa výhodnosť vetiev môže meniť. Existujú mnohé metódy, ktoré sú uspokojené dynamickému vyrovnávaniu [37]. Napríklad :

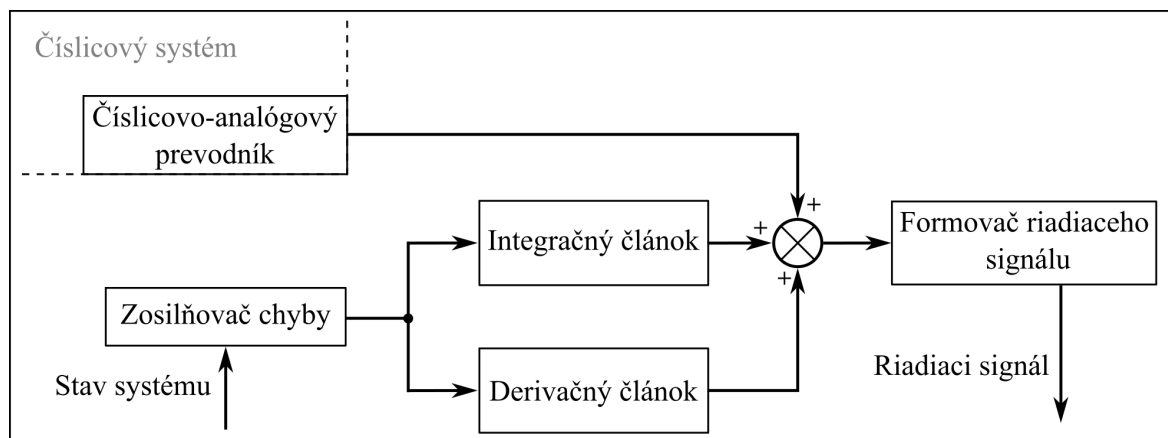
- Aukcia – (z angl. „Bidding“) Metóda vyrovnávania zát'aže, kde každá vetva pred zadením úlohy spočíta a ohlásí svoje náklady na túto úlohu. Riadiaci systém potom úlohou poverí vetvu s najvýhodnejšími nákladmi. Vlastnosti vyhodnocované ako náklady sú špecifické implementácii – napr. čas vykonania, spotrebovaná energia, prenesené dáta a iné. Vyhodnocovanie systému pri každej úlohe je výhodné, ak je odhad náročnosti úlohy nepresný. Veľ a malých úloh však môže vytvoriť mnoho režijných výpočtov.
- Heuristika – Forma optimalizácie s rôznymi algoritmi. V prípade vyrovnávania zát'aže sú často používané algoritmy typu „Mravčia kolónia“ a „Evolúcia“. V skratke ide o postupy, ktoré iteratívne zlepšujú existujúce riešenie.

Vyrovňovanie napájacieho systému sa od spomínaných prípadov odlišuje v spojitom charaktere problému. Energia do zát'aže musí prúdiť spojitou, nie po paketoch či úlohách. Na prehodnotenie rozloženia zát'aže je preto ešte menej času. V súčasnosti však existuje riešenie aj takéhoto problému. Napätie reálnych zdrojov vplyvom ich vnútorného odporu mierne klesá pri zvyšujúcej sa zát'aži. „Droop control“ metóda tento jav využíva na vyrovnávanie zát'aže medzi viacerými zdrojmi. Implementácia môže mať podobu priameho paralelného spojenia zdrojov (najčastejšia podoba) alebo podobu riadení, kde regulátor vyhodnocuje relatívne napätia zdrojov [34]. Priamo spojiť je možné len podobné zdroje, nakoľko odlišná charakteristika zdroja by mohla spôsobiť nesprávne rozloženie zát'aže. Tento jav je možné pozorovať na akumulátorových sadách, kde kombinácia nových a starých článkov spôsobí neúplné využitie kapacity starých článkov. Použitie regulátora umožňuje upraviť úroveň napätí a tým sa tomuto problému vyhnúť [12] [45].

Alternatívou k „droop“ metóde, čiže k vyrovnávaniu zát'aže analógovými prostriedkami, je použitie digitálneho riadenia. Riadenie napájacieho systému pomocou číslicového počítača namiesto analógového regulátora má svoje pozitíva aj negatíva. Hlavnou nevýhodou číslicového prístupu je pomalá odozva. Reakciu počítača obmedzuje rýchlosť analógovo-číslcového prevodníka, ktorý riadiaci program informuje o zmene systému. Pri analógovom regulátore je rýchlosť odozvy obmedzená len parazitnými vlastnosťami obvodu. Číslicové riešenie má avšak veľkú výhodu vo formovaní charakteristiky riadenia. Základný analógový regulátor dokáže reagovať na odchýlku regulovanej veličiny v podstate len monotónne – pridať pri deficite, odobrať pri prebytku. Číslicové riadenie môže meniť charakter riadenia ľubovoľne aj pri najmenšej zmene vstupných parametrov. Taktiež umožňuje jednoduchšie škálovanie riadenia zohľadňujúce viaceré vstupné veličiny [38] [52] [53] [61].

2.1.2 Spojenie číslicového a analógového riadenia

Pri návrhu riadenia heterogénneho systému sa vnucuje myšlienka spojenia viacerých riadiacich metód do jednej. Kombinácia tých správnych vlastností číslicového a analógového riadenia má potenciál vytvoriť riadenie s lepšími celkovými vlastnosťami. Do istej miery sa snaha kombinácie týchto dvoch metód prejavuje aj v súčasnej elektronike – operačné zosilňovače s digitálnym vývodom pre vypnutie, regulátory so sériovou linkou pre nastavenia, rádiové vysielace so vstavanou podporou protokolu. Pre adaptívne riadenie napájacích systémov je výhodné rozšírenie vlastností číslicového riadenia o rýchlosť reakcie a jemnejšie rozlíšenie analógového riadenia. Tieto dve vlastnosti, ktoré diskretný systém nedokáže nahradiť, môžu byť do neho zakomponované spôsobom zobrazeným na obrázku 15. Tento systém sa podobá na bežný PID regulátor. Derivátor v ňom zabezpečuje rýchle skoky pri zmene parametrov a integrátor pomaly dotahuje výstup na presnú hodnotu. Rozdielom je nahradenie proporciálnej zložky za číslicové riadenie. V takomto systéme nie je na číslicový systém kladený dôraz na rýchlosť odozvy a ani presnosť výstupu. Číslicový systém namiesto toho umožňuje zapojeniu reagovať na podstatne viac faktorov, pri ktorých by bola analógová implementácia neporovnateľne komplikovanejšia.



Obr. 15: Bloková schéma potencionálne výhodného spojenia číslicového a analógového riadenia

2.1.3 Číslicové riadenie na základe priestoru

Jednou z možností číslicového riadenia je použitie priestoru (R), ktorého vstupné parametre sú namerané elektrické veličiny (vektor $\mathbb{A}$) a výstupné bunky uchovávajú hodnoty riadiacich veličín alebo spôsob ich výpočtu (vektor $\mathbb{X}$).

$$R(\mathbb{A}) = \mathbb{X} \quad (5)$$

Riadenie systému na základe priestoru R najprv vyžaduje jeho vyplnenie dátami. Najjednoduchší spôsob ich získania je výpočet na základe modelov. Tento prístup je najrýchlejší,

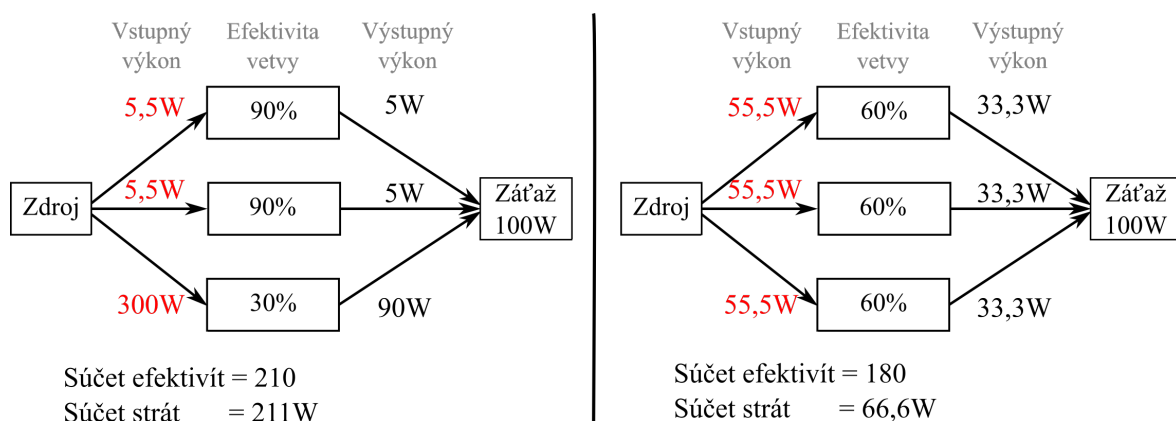
no zároveň najmenej presný kvôli zjednodušeniam v modeloch či nepresným hodnotám súčastok použitých pri výpočte. Presnejší a časovo náročnejší spôsob je získanie dát z experimentálnych meraní. Týmto spôsobom budú získané dáta zohľadňovať reálne vlastnosti konkrétnych súčastok obvodu (nie len ich priemernú hodnotu udávanú výrobcom) a zároveň bude zachytený vplyv akýchkoľvek javov, na ktoré model neprihliadal. Získanie optimálnej hodnoty riadiaceho vektora $\mathbb{X}$ ale vyžaduje vyskúšanie každej kombinácie jeho členov a následné meranie vlastností systému. Tento postup je vyžadovaný pre každú kombináciu vstupných parametrov vektora $\mathbb{A}$. Veľkosť priestoru je možné upraviť zmenou rozlíšenia parametrov. Tým je možné upraviť pamäťovú náročnosť pre konkrétnu aplikáciu, no problém výpočtovej náročnosti nejde kvôli presnosti úplne potlačiť. Pri prehnane hrubom rozlíšení by mal regulovaný výstup veľkú odchylku od požadovanej hodnoty, čo by mohlo poškodiť celý systém. Existuje iné riešenie, ako znížiť výpočtovú náročnosť za cenu presnosti. Použitím heuristickej optimalizácie sa docieľi zmenšenie množiny parametrov, ktorých kombinácie budú otestované. Zároveň nie je možné dokázať, že takto nájdené riešenie je optimálne. Pre systém, kde cieľom riadenia je minimalizácia výkonovej straty, môže všeobecná definícia optimalizovaného problému mať podobu na obrázku 16.

$$\begin{aligned} \text{Minimalizácia : } & P_{Loss} = f(\mathbb{A}, \mathbb{X}) \\ & \text{argmin: } \mathbb{X} \in \left\{ i \cdot \text{rozlišenie} \right\}_{i=0}^{max} \\ \text{Za podmienok : } & \mathbb{Z}(\mathbb{A}, \mathbb{X}) \end{aligned}$$

Obr. 16: Všeobecná definícia problému pre optimalizáciu riadenia

Pričom hodnota funkcie f je nameraná hodnota straty pri parametroch prostredia $\mathbb{A}$ a riadiacich parametroch $\mathbb{X}$. Riadiace parametre môžu byť menené optimalizáciou v rozsahu od nuly až po definované maximum s definovaným rozlíšením. Pri testovaní na reálnom systéme je potrebné dodržiavať jeho operačné požiadavky, ktoré sú všeobecne zhrnuté vo vektore $\mathbb{Z}$.

Prečo je ale účelom optimalizačnej funkcie minimalizácia výkonovej straty namiesto maximalizácie efektivity? Je to z dôvodu jednoduchšieho vyčíslenia hodnoty účelovej funkcie. Celková strata paralelného systému vznikne sčítaním strát na jednotlivých vetvách. Rovnaká operácia s efektivitou má potenciál byť chybná, kvôli nepriamej úmernosti efektivity a dodávaného výkonu v danej vetve. To znamená, že niekoľko vetiev, cez ktoré tečie minimálny výkon by v súčte zatienili jednu vetvu s nízkou efektivitou, cez ktorú tečie neporovnateľne väčší výkon. Toto riešenie by sa potom zdalo výhodnejšie, ako systém s vyrovnaným zaťažением všetkých vetiev, ktorého strata je však menšia. Vysvetleniu pomôže obrázok 17. Tomuto javu je možné predísť matematickými úpravami normujúcimi hodnotu efektivity, ktoré sú však zložitejšie, než použitie hodnoty straty alebo k nej priamo vedú.



Obr. 17: Bloková schéma vysvetľujúca vhodnosť výkonovej straty ako účelovej hodnoty

Výpočtom definovaného problému v laboratórnych podmienkach je možné naplniť dáta priestoru R . S týmto priestorom je číslkové riadenie pripravené vyrovnať záťaž konkrétneho systému (ktorý bol použitý pri výpočte) v aplikácii. Výhodou takéhoto komplikovanejšieho riešenia je jednoduchá modularita požiadaviek. Pri laboratornom výpočte stačí špecifikovať iné požiadavky a algoritmus sa pokúsi vybrať vhodné riadiace parametre. Ak to aplikácia dovoľuje môžu byť ďalšie požiadavky pridávané aj mimo testovacieho laboratória. Príkladom takýchto požiadaviek sú :

- Operácia solárnych panelov v bode maximálneho výkonu.
- Rozsah napätia akumulátora, v ktorom môže byť používaný.
- Nižšie úrovne vyrovňovania - preferencia zdrojov podľa ďalšej vlastnosti (napr. cena, rýchlosť odozvy).

Vlastnosti takéhoto číslkového riadenia založeného na priestore riadiacich veličín do veľkej miery záležia na kvalite optimalizácie. Algoritmus pre úlohy s kombinačným charakterom má rýchlo rastúcu výpočtovú zložitosť. Jednou z možností jej zjednodušenia je rozdelenie priestoru na menšie časti. Vzhľadom na charakter úlohy je možné rozdeliť priestor na podpriestory charakterizujúce : topológiu, súbor vetiev z rovnakými koncami, zvyšok systému. Pri výpočte podpriestoru je vektor parametrov prostredia redukovaný na tie relevantné. Pre výpočet podpriestoru jednej topológie sú to : vstupné a výstupné napätia a prúdy. Rovnako redukovaný je aj vektor riadiacich veličín, z ktorého ostanú parametre špecifické topológii. Niekoľko príkladov typov topológií a veličín nutných k ich riadeniu :

- Asynchrónny Buck – (spolu 2) strieda, frekvencia.
- Synchronný Sepic – (spolu 5) primárna strieda, sekundárna strieda, oneskorenie nábehu, oneskorenie dobehu, frekvencia.
- Synchronný 4-spínačový Buck-Boost – (spolu 6) primárna strieda, sekundárna strieda, oneskorenie nábehu, oneskorenie dobehu, frekvencia.

Vybratie týchto riadiacich parametrov výrazne zníži rozsiahlosť preskúmaného priestoru a zároveň je výpočtová zložitosť vytvoreného podpriestoru minimálna. Ďalšie zjednodušenie je dosiahnuteľné spojením paralelných vetiev, ktoré zdieľajú jeden začiatok aj koniec. V hlavnom priestore budú prúdy jednotlivých vetiev nahradené jedným prúdom, ktorého hodnotu si vetvy rozdelia vo výpočte podpriestoru. Parametre prostredia budú pri výpočte podpriestoru opäť redukované na tie týkajúce sa spoločného začiatku a konca vetiev – napr. napätia a celkový prúd. Riadiace parametre, ktorých výhodné hodnoty treba nájsť, budú v tomto prípade prúdy jednotlivými vetvami. Miera zjednodušenia teda závisí od počtu nahradzovaných vetiev. Oba spomínané podpriestory je možné vytvoriť vďaka nezávislosti zjednodušovaných parametrov od zvyšku systému. Nedá sa vylúčiť, že v praktická implementácia ukáže ďalšie špecifické podpriestory, ktorých oddelený výpočet zjednoduší celkový priestor. Vzhľadom na rýchly nárast zložitosti kombinatorického priestoru v závislosti od počtu a rozsahu parametrov, dokáže aj malá redukcia parametrov výrazne znížiť počet prvkov priestoru.

2.1.4 Adaptívne vyrovňovanie zát'aže

Jednorázová diagnostika systému pred jeho nasadením do aplikácie nie je optimálna, ak pri výpočte neboli zohľadnené všetky vplyvy prostredia, alebo niektorý z parametrov obvodu bol zmenený (napr. poškodením alebo starnutím). Analógové riadenie je do istej miery schopné prispôbiť sa týmto zmenám. Číslicové riadenie však k tomuto účelu vyžaduje osobitný algoritmus. Tento algoritmus môže mať mnoho podôb. Jednoduchou z nich je špeciálna optimalizačná funkcia, ktorá mierne vychýli uje riadiace parametre z ich aktuálnej hodnoty. Ak by niektoré vychýlenie zlepšilo cieľovú vlastnosť, tak by nová hodnota parametra bola zapísaná do riadiaceho priestoru. Nevýhodou tohto prístupu je vplyv ladenia parametrov na hodnotu cieľovej funkcie a na podmienky stability. Všetky vlastnosti by v podstate boli vo svojej najlepšej vypočítanej polohe zriedka [14] [19].

Sofistikovanejší algoritmus je možné vytvoriť pridaním rozhodovacích stromov na riadenie optimalizácie. Pomocou riadenia vyššej úrovne je možné obmedziť čas behu optimalizácie, a testované parametre. Vzniknutá meta-optimalizácia teda menej deformuje účel a podmienky riadenia. Hranice rozhodnutí – „kedy“, „čo“ a v prípade viacerých dostupných optimalizačných metód aj „ako“ (začať optimalizovať) – môžu byť taktiež upravované za účelom skvalitnenia riadenia (nižšia vlastná spotreba, menej častá operácia mimo najlepšej hodnoty).

Aj iné algoritmy strojového učenia môžu zdokonaliť riadenie na základe priestoru redukciou pamäťovej náročnosti pomocou neurónovej siete. Vhodne natrénovaná neurónová sieť dokáže dekódovať kombináciu vstupných parametrov prostredia na kombináciu výstupných riadiacich parametrov. Tým by priestor úplne nahradila. Z hľadiska výrazného zníženia pamäťovej náročnosti pri malom náraste výpočtovej náročnosti to je výhodné. No pri zmene charakteristiky systému je nutné „pretrénovať“ celú neurónovú sieť, čo opäť vyžaduje celý

priestor. Zároveň je to výpočtovo náročnejšie, ako pri iných metódach strojového učenia, schopných zmeniť len časť charakteristiky. Tento prístup je teda vhodný len do „presnejšie“ identifikovaných systémov, ktorých charakteristika nepotrebuje úpravy.

Priebeh strojového učenia na reálnych systémoch obmedzuje nutnosť čakania na odozvu systému. Algoritmy strojového učenia majú bežne iteračný priebeh. Mnoho z nich je založených na možnosti realizácie mnohých pokusov. Kvalita takýchto algoritmov je vnímaná ako pomer dosiahnutého výsledku k času výpočtu. Čas výpočtu je následne možné znížiť pomocou paralelných výpočtov na mnohých počítačoch. Pre reálne systémy sú však výhodnejšie algoritmy realizujúce menej iterácií, pretože aj pri zmenšení výpočtového času výkonnými počítačmi je potrebný čas na zachytenie odozvy systému, ktorého výraznejšie zmenšenie vplýva negatívne na systém.

2.2 Návrh modelových aplikácií

Následne sa pozrieme na niekoľko konkrétnych aplikácií napájacích obvodov a na spôsoby ich optimalizácie. Aplikácie sú ukážkou úloh, s ktorými sa implementácia heterogénneho paralelného systému najpravdepodobnejšie stretne. Účelom napájacieho systému v týchto aplikáciách je pracovať čo najefektívnejšie (premieňať čo najmenej energie na teplo).

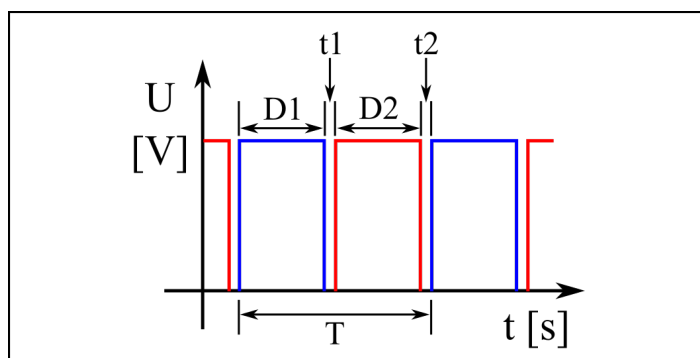
Modely aplikácií predpokladajú, že systém meria napätia a prúdy všetkých zdrojov a záťaží. Energetická účinnosť istého zapojenia je potom vypočítaná ako podiel výstupného výkonu ku vstupnému výkonu. Optimalizačné metódy počas výpočtu zapríčinia kolísanie elektrických vlastností. Je preto nutný predpoklad, že pre systém toto kolísanie nie je deštrukčné. Optimalizácie taktiež predpokladajú statickú záťaž (v priebehu výpočtu nezmení hodnotu). V praktickej implementácii je možné kompenzovať zmeny pozastavením optimalizácie a spustením novej, so zmenenými parametrami alebo pokračovaním staršej, ktorá počíta s aktuálnymi hodnotami parametrov.

Všetky príklady používajú konvertory (reprezentované farebnými šípkami), ktoré majú jeden zdroj a jednu záťaž. Pre komplikovanejšie systémy je teoreticky výhodnejšie použiť zapojenie pripojené na viacej zdrojov či záťaží súčasne. Praktická realizácia je však obmedzená vlastnosťami komponentov. Jednoduchým pridaním polovodičových spínačov pre každý zdroj nie je zaručená izolácia zdrojov počas celého spínacieho cyklu. Úprava obvodu, ktorá zamedzuje neriadenému toku energie, znižuje efektivitu, čo je proti hlavnému cieľu. Alternatívou je použitie elektromechanických relé, ktoré dokážu prepínať vstupy úplne izolovať. No ich nevýhodou je nezanedbateľná strata energie pri prepnutí. Technológia viac-vstupových konvertorov je v súčasnosti aktívne skúmaná [26] [27] [33]. Táto práca sa ale sústreďuje na vývoj riadenia, ktoré je preto testované na jednoduchých topológiách s jedným vstupom a jedným výstupom.

Dáta vytvoreného priestoru je možné použiť nielen na riadenie, ale aj na optimalizáciu hardvérového návrhu systému. Z dát je možné zistiť najviac a najmenej používané zapojenia ako aj podmienky najnižšej efektivity. Tieto informácie môžu byť použité pri kompozícii obvodov systému ako aj pri ďalšom vývoji nových zapojení.

2.2.1 Konvertor s jednou topológiou

Riadenie jednoduchého konvertora s jednou topológiou má za úlohu formovanie riadiaceho signálu tak, aby výstup spĺňal požiadavky (typicky konštantnú úroveň napätia či prúdu). Ako bolo spomínané, štandardne sa k tomu používa regulátor so spätnou väzbou. Jeho vlastnosti sú ale nedostačujúce pre komplikovanejšie systémy. Výhodnosť navrhovaného riadenia oproti štandardnému regulátoru je možné ukázať aj na synchronnom riadení jednej topológie. Asynchronné riadenie vyžaduje len dva parametre – striedu a frekvenciu signálu. Oproti tomu efektívnejšie synchronné riadenie ich potrebuje viac – strieda prvého tranzistora (D1), strieda druhého tranzistora (D2), oneskorenie zapnutia (t_1), oneskorenie vypnutia (t_2), frekvencia ($1/T$).



Obr. 18: Priebeh spínania synchronných tranzistorov

Potrebné hodnoty týchto parametrov na dosiahnutie konštantného napätia na výstupe konvertora závisia od použitých súčiastok, návrhu plošného spoja, ale aj od vstupných a výstupných napätí a prúdov. Návrh regulátora so spätnou väzbou, ktorý mení viacero riadiacich veličín na základe viacerých vstupných veličín prakticky nie je možný. Preto majú mnohé súčasné implementácie zvolené niektoré parametre ako konštanty – typicky T , t_1 , t_2 . Výhody dynamického charakteru týchto parametrov sú v súčasnosti výskumným cieľom mnohých inštitútov. Existuje preto mnoho metód na ich určenie a prispôbovanie počas operácie [42] [65]. Jedným zo známych spôsobov je úprava týchto parametrov na základe celkovej efektivity systému. Tento spôsob je menej používaný, nakoľko je potrebné merať efektivitu systému (aj v bežnej prevádzke) a vedieť ľubovoľne upravovať spomínané parametre, aby bolo možné prejsť ich všetky kombinácie. Tieto požiadavky vyžadujú číslicový počítač. Oproti iným spôsobom sa týmto stráca jednoduchosť riadenia, no získava sa jeho univerzálnosť, čo sa prejaví na lepšej kvalite riadenia (väčšia účinnosť, menšie zvlnenie, rýchlejšia reakcia a podobne)

Algoritmus navrhovaného riadenia ale nepoužíva analytické rovnice na určenie hodnôt parametrov. Namiesto toho určí ich hodnoty pomocou experimentu pred nasadením do operácie. Experiment zahŕňa výpočet riadiacich hodnôt pri všetkých kombináciách vstupných parametrov zo špecifikovaného rozsahu. Výsledok výpočtu pri jednej kombinácii vstupov

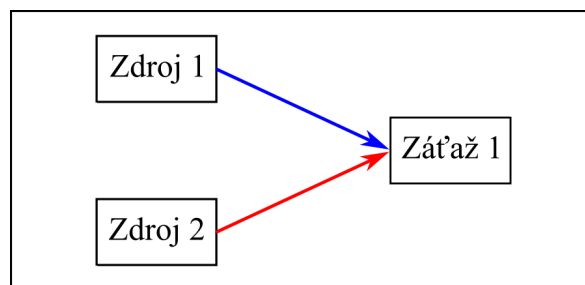
bude tvoriť jeden bod priestoru, ktorý bude v pamäti riadiaceho počítača. V tomto prípade bude výpočet riešiť optimalizačný problém, ktorý môže mať podobu ako na obrázku 19.

Minimalizácia : $P_{\text{Loss}} = f(U_{\text{Zdroj1}}, I_{\text{Zdroj}}, U_{\text{Zát'az}}, I_{\text{Zát'az}}, D1, t1, D2, t2, T)$ $\text{argmin} : D1, D2 \in \{0; 1; \dots; 1278; 1279\}$ $t1, t2 \in \{-10; -9; \dots; 9; 10\}$ $T \in \{1.25; 2.5; 5; 10; 20; 40\} [\mu\text{s}]$ Za podmienok : $D1+D2+t1+t2 < 1280;$ $U_{\text{Zát'az}} = 3,3\text{V};$

Obr. 19: Účelová funkcia optimalizácie spínania konvertora

2.2.2 Konvertor s paralelnými vetvami

Tento príklad opisuje vlastnosti základného paralelného systému, v ktorom má jedna záťaž k dispozícii dva spôsoby napájania. Tie môžu reprezentovať dva rôzne konvertory z jedného zdroja, alebo dva nezávislé zdroje, každý so svojim konvertorom ako na obrázku 20.



Obr. 20: Bloková schéma základného paralelného systému napájania

Riadenie takéhoto systému musí nastavovať riadiace veličiny nielen v závislosti od externých faktorov (vstupné a výstupné napätia a prúdy), ale aj podľa vzájomných vzťahov týchto veličín. To znamená zvýšenie odberu energie z jedného zdroja musí prebehnúť zároveň so znížením odberu z druhého. Rozloženie energie vyžadovanej záťažou medzi dva zdroje sa dá chápať ako samostatný problém izolovaný od spínacích parametrov. Jednoduché a často používané riešenia rozdeľujú požadovanú energiu : rovnomerne (napr. regulátor procesora stolného počítača), pomerom určeným istou vlastnosťou (napr. správa akumulátorov), prioritou (napr. záložný zdroj). Navrhované riadenie podľa priestoru riadiacich veličín umožňuje aj komplikovanejšie riešenia. Napríklad v prípade, ak je jeden zdroj solárny panel a druhý elektrická sieť. Rozloženie odberu z týchto zdrojov musí zohľadňovať pracovný bod solárneho panelu, jeho obmedzený maximálny výkon, cenu energie z elektrickej siete atď. Ak záťaž vyžaduje konštantné napätie, môže účelová funkcia optimalizácie naplňujúcej priestor mať podobu ako na obrázku 21. Maximalizácia výkonu odoberaného z panelu tvorí v tejto optimalizácii ďalšiu optimalizáciu nižšej úrovne. Riadenie tejto vnorenej optimalizácie mení jediný parameter - odoberaný prúd. Implementácia celkovej optimalizácie by mala

zohľadňovať obmedzenú kontrolu nad týmto parametrom. Podmienky optimalizácie môžu obsahovať aj inú voľbu priority. Napríklad pri funkcii záložného zdroja, kde sekundárny zdroj bude použitý, len ak primárny vypadne.

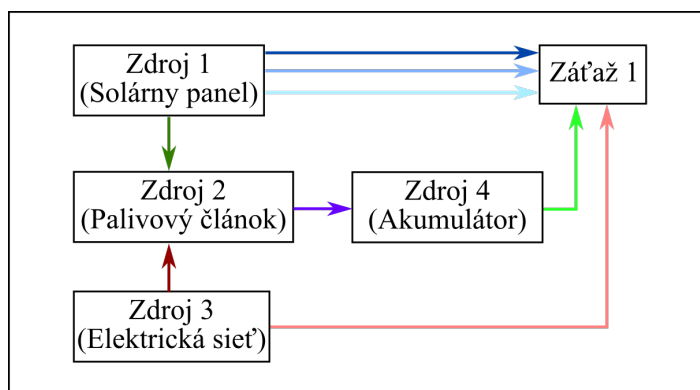
$$\begin{aligned} \text{Minimalizácia : } P_{\text{Loss}} &= f(U_{\text{Zdroj1}}, I_{\text{Zdroj1}}, U_{\text{Zdroj2}}, I_{\text{Zdroj2}}, U_{\text{Zát'az}}, I_{\text{Zát'az}}) \\ \text{argmin : } I_{\text{Zdroj1}}, I_{\text{Zdroj2}} &\in I_{\text{Rozsah}} \\ I_{\text{Rozsah}} &= \{0, 0.01, 0.02, 0.03, \dots, 1\} \text{ [A]} \\ \text{Za podmienok : } U_{\text{Zát'az}} &= 3,3\text{V}; \\ \text{(MPPT) maximalizácia : } P_{\text{Zdroj1}} &= U_{\text{Zdroj1}} \cdot I_{\text{Zdroj1}} \end{aligned}$$

Obr. 21: Účelová funkcia optimalizácie systému so solárnym panelom a jeho zálohou

Takéto riadenie je možné implementovať aj mimo napájacích systémov. Napríklad pre dopravný prostriedok s viacerými heterogénnymi pohonnými jednotkami. Konkrétne môže ísť o auto, ktoré má jednu nápravu poháňanú benzínovým spaľovacím motorom a druhú nápravu poháňanú nábojovými elektromotormi v jej kolesách. Ak sa pridá možnosť spaľovania LPG namiesto benzínu, tak má riadenie neľahkú úlohu del'by zát'aže pohonných jednotiek na zabezpečenie čo najdlhšieho dojazdu. Tento účelu taktiež ovplyvňujú premenlivé externé faktory ako vlastnosti vzduchu, stav kolies a vozovky, smer a sila vetra. Definícia problému je dostatočne blízka problémom napájacích systémov, čiže rovnaký princíp riadenia môže výhodne fungovať aj v takomto prípade.

2.2.3 Komplexný systém

Navrhované riadenie má potenciál zvládať aj komplexnejšie systémy. Zložitosť komplexnejšieho heterogénneho systému rastie v dvoch smeroch – v štruktúre vetiev a v množstve špecifických požiadaviek. Ako príklad je použité zapojenie systému na obrázku 22.



Obr. 22: Účelová funkcia systému so solárnym panelom a jeho zálohou

Tento systém obsahuje zdroj, ktorý počas prevádzky výrazne mení svoje vlastnosti – solárny panel. Vysoká účinnosť konverzie napätia takéhoto zdroja je zabezpečená tromi typmi konvertorov, ktorých operácia sa prispôbuje aktuálnym podmienkam (šípky v odtieňoch

modrej). Ďalej systém obsahuje dva zdroje, s vyšším počtom špecifických požiadaviek – akumulátor a palivový článok. Riadenie musí prihliadať na ich obmedzenú kapacitu, rozsah pracovných napätí, teplotu a maximálny výkon. Práve obmedzený výkon je dôvod zapojenia palivového článku a akumulátora sériovo. Oba zdroje pracujú s energiou na základe chemickej reakcie. Rýchlosť tejto reakcie obmedzuje maximálny výkon. Chemické prvky palivového článku reagujú na elektróde a následne ju musia fyzicky opustiť, aby umožnili reakciu ďalších prvkov. Oproti tomu sú v akumulátore (napr. Li-pol) všetky prvky v kontakte s elektródou po celý čas. Závislosť maximálneho výkonu palivového článku od fyzického pohybu zapríčiňuje jeho podstatne nižšie hodnoty ako u akumulátora. Akumulátor v tomto zapojení slúži ako malá zásoba energie, ktorá istý čas dokáže dodávať energiu záťaži, aj v prípade výkonu vyššieho než je maximum palivového článku. Takáto funkcionality dovoľuje lacnejšiu implementáciu alebo väčšiu kapacitu, než použitie samostatného akumulátora s väčšou kapacitou. Posledným zdrojom v systéme je elektrická sieť, ktorá má funkciu energetickej zálohy pri dlhodobo nepriaznivom počasí a funkciu bezpečnosti na udržanie parametrov chemických zdrojov v prípustných rozsahoch.

Pokiaľ má byť riadenie efektívne, musí sa popísaným vlastnostiam prispôbiť. Optimalizačná metóda teda nie je zaťažená len veľkým počtom parametrov, ale aj rozmanitými podmienkami. Výpočet niektorých podmienok môže byť časovo náročný, no iné podmienky môžu mať pozitívny vplyv. Napríklad zmenšenie prehľadávaného priestoru obmedzeným rozsahom napätia akumulátora, alebo zavedením miery neprípustnosti do účelovej funkcie pomocou odchýlky napätia záťaže od požadovanej konštantnej úrovne. Optimalizovaný problém môže byť zapísaný v podobe na obrázku 23. Rovnaký systém môže mať aj inak zadanú optimalizáciu, v závislosti na konkrétnych požiadavkách či vlastnostiach zdrojov.

Minimalizácia : $P_{\text{Loss}} = f(U_{\text{Zdroj1}}, I_{\text{Zdroj1.1}}, I_{\text{Zdroj1.2}}, I_{\text{Zdroj1.3}},$ $U_{\text{Zdroj2}}, I_{\text{Zdroj2}}, U_{\text{Zdroj4}}, I_{\text{Zdroj4}},$ $U_{\text{Zdroj3}}, I_{\text{Zdroj3.1}}, I_{\text{Zdroj3.2}}, U_{\text{Zátáž}}, I_{\text{Zátáž}})$ $\text{argmin} : I_{\text{Zdroj1.1}}, I_{\text{Zdroj1.2}}, I_{\text{Zdroj1.3}}, I_{\text{Zdroj3.1}}, I_{\text{Zdroj3.2}} \in I_{\text{Rozsah1}}$ $I_{\text{Zdroj2}}, I_{\text{Zdroj4}} \in I_{\text{Rozsah2}}$ $I_{\text{Rozsah1}} = \{0, 0.01, 0.02, 0.03, \dots, 1\} \text{ [A]}$ $I_{\text{Rozsah2}} = \{0, 0.01, 0.02, 0.03, \dots, 0.6\} \text{ [A]}$	Solárny panel, Palivový článok, Akumulátor, Elektrická sieť, Zátáž
Za podmienok : $U_{\text{Zátáž}} = 3.3\text{V};$ $U_{\text{Zdroj2}} > 9.0\text{V}, U_{\text{Zdroj4}} \in <3.0; 4.2> \text{ [V]};$ (MPPT) maximalizácia : $P_{\text{Zdroj1}} = U_{\text{Zdroj1}} \cdot (I_{\text{Zdroj1.1}} + I_{\text{Zdroj1.2}} + I_{\text{Zdroj1.3}});$ $P_{\text{Zdroj4}} > P_{\text{Zdroj2}};$ $(P_{\text{Zdroj1}} + P_{\text{Zdroj4}} \geq P_{\text{Zátáž}}) \Rightarrow P_{\text{Zdroj3}} = 0;$	

Obr. 23: Účelová funkcia optimalizácie komplexného systému

Navrhnutú metodiku riadenia je možné použiť aj na podobné systémy v iných oblastiach.

Princíp štruktúry na obrázku 22 sa bežne nachádza pri plánovaní výroby produktu, kde sú vyžadované rôzne procesy, ktoré môžu byť zabezpečené viacerými spôsobmi. Metodika má potenciál byť užitočná aj pri plánovaní výsadby polí za účelom najvyššieho zisku farmára, či v mnohých iných ekonomických rozhodnutiach. Principiálne je však výhodnejšia pre systémy s rýchlejšou odozvou, kde chyby počas optimalizácie nie sú deštruktívne.

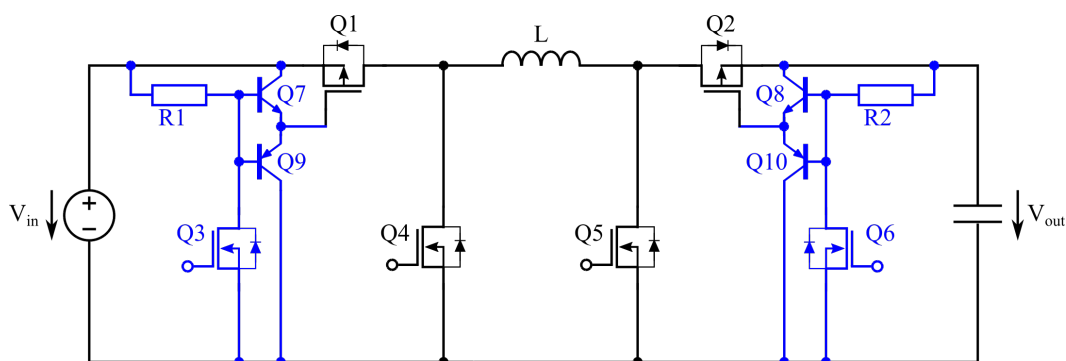
Pri pohľade na komplikovanejší systém sa jeho definícia podobá problémom minimalizujúcim medián. Cieľ týchto úloh je však odlišný. Výpočet mediánu hľadá výhodné cesty/možnosti v homogénnej úlohe. Pri napájacom systéme sú cesty pevne dané hardvérom a optimalizácia hľadá výhodné zaťaženie týchto ciest. Pre heterogénny systém to znamená, že v systéme môžu krátkodobo prebiehať nesúvisiace deje, ktorých medián nemá praktický význam.

Experimentálna realizácia systému

Zozbierané informácie a navrhnuté postupy sú v tejto kapitole použité na reálne systémy, ktorých výsledné vlastnosti sú zaznamenávané v laboratórnych podmienkach. Experimentálne systémy sa skladajú z diskretných súčiastok. Pokiaľ nie je uvedené inak, tak použité súčiastky sú totožné s tými, ktorých hodnoty boli použité pri výpočte modelov (tabuľka 2 na strane 23). Diskrétné komponenty majú oproti vyhotoveniu, ktoré je integrované v jednom čípe výraznejšie odchýlky a anomálie. Vlastnosti integrovaného vyhotovenia by boli bližšie hodnotám z modelov. Experimentálne namerané vlastnosti obvodov sú najviac ovplyvnené dvoma problémami : vlastnosťami tranzistorov a vlastnosťami riadenia.

Reálne tranzistory majú niekoľko súvisiacich komplikácií. Implementácia spínača v podobe MOSFET tranzistora má definované rozpätie riadiaceho signálu, kedy menia svoj stav. Konkrétne pre tranzistory typu P na obrázku 24 (Q1, Q2) je táto hranica závislá od vstupného resp. výstupného napätia. Riadiaci obvod môže signál vytiahnuť najviac na svoje napájacie napätie (typicky 3,3V). Z tohto dôvodu je nutný obvod, ktorý riadiace napätie prispôsobí vyššiemu vstupnému napätiu (modrá časť obrázku 24). Tento obvod spôsobuje stratu nezohľadnenú modelom. Závislosť riadiaceho napätia od vstupného napätia môže byť ale aj nevýhodná. Hlavne pri nízkom vstupnom napätí, kedy by riadiaci prvok bol schopný otvoriť tranzistor, no vstupné napätie nie. Napäťová hranica otvorenia tranzistora obmedzuje najmä zobrazenú Buck-Boost topológiu (obrázok 24), nakoľko je na jej vstupe tranzistor (Q1), ktorý je nutné otvoriť zo vstupného napätia. Nadväzujúcim javom je hystéza otváraciej hranice. Tá zapríčiňuje, že ak po otvorení tranzistora istým riadiacim napätím je nutné tranzistor zavrieť, tak musí riadiace napätie klesnúť pod podstatne nižšiu hranicu, než bola tá otváracia. Pre Buck-Boost topológiu je tento jav výhodný, nakoľko keď vstupné napätie raz otvorí vstupný tranzistor, tak musí výraznejšie klesnúť, aby nebolo schopné udržať tranzistor otvorený. Zeta topológia tým ale nič nezíska, pretože musí vstupný tranzistor spínať, čiže opakovane prekračovať obe hranice. Oproti nim Sepic a Fly-back topológie tento problém nemajú, pretože v asynchrónnom režime otvárajú len tranzistor typu N priamo z napätia riadiaceho prvku.

Pre úplnú kontrolu nad experimentami je systém riadený len číslicovo. Tým vzniká niekoľko problémov charakteristických pre diskretné riadenie spojitého systému. Prvým z nich je obmedzené rozlíšenie riadiaceho signálu, ktoré zvyšuje odchýlku výstupného napätia od žiadanej hodnoty. Druhým je pomalšia odozva závislá od rýchlosti analógovo-číslícového prevodníka. Pre kompenzáciu týchto javov prebiehajú experimenty pri konštantných úrovniach výstupného prúdu. Ich hodnoty sú pritom v experimentoch menšie než testovali modely, čo je z dôvodu výkonového obmedzenia. Cieľom meraní je zachytiť aj nízku hodnotu účinnosti a podmienky, pri ktorých nastáva. Maximálny výkon obmedzuje tieto merania tým,



Obr. 24: Schéma buck-boost konvertora so štyrmi spínačmi a ovládačmi tranzistorov typu P (Q1 a Q2)

že nízka hodnota účinnosti (napr. 20%) vyžaduje, aby do obvodu vstupoval 5-násobne vyšší výkon. Čiže aj menšia záťaž môže priviesť silnejšie komponenty na svoju tepelnú hranicu. Kvôli kompenzácii diskrétného riadenia ďalej postačuje, ak je výstupné napätie v rozsahu $\pm 100\text{mV}$ od žiadanej hodnoty, aby bolo považované za platné. Všetky experimentálne namerané dáta splňujú podmienku platného výstupného napätia. V opačnom prípade je ich efektivita vyčíslená nulou. V meraniach sú nulové hodnoty viditeľné hlavne pri nízkom vstupnom napätí, čo je spôsobené obmedzeným ziskom reálneho zapojenia. Minimálne vstupné napätie, pri ktorom je možné dosiahnuť reguláciu výstupu je v experimente obmedzené dvomi hlavnými faktormi. Parazitnými vlastnosťami komponentov a spomínanou napäťovou hranicou potrebnou k otvoreniu tranzistorov. Potrebné minimálne vstupné napätie rastie s rastúcim výstupným prúdom.

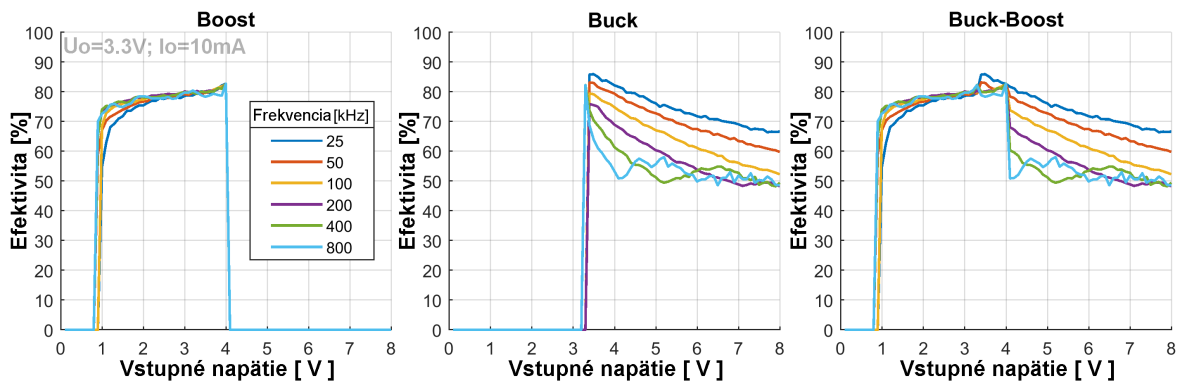
Na riadenie experimentu bol použitý mikrokontrolér STM32F373, ktorého súčasťou je špeciálny časovač s vysokým rozlíšením. Mikrokontrolér je napájaný z osobitného zdroja nezávislého na meraní. Napätia a prúdy v obvode merajú obvody INA219. Mikrokontrolér z nich zberá dáta cez I2C zbernicu. Pre potlačenie šumu je každá hodnota, ktorá je použitá vo výpočtoch, výsledkom aritmetického priemeru šesťnástich nameraných vzoriek. Priemerované hodnoty sú taktiež odosielané do stolného počítača, ako zdroj dát uvedených grafov. Zobrazované hodnoty efektívity sú z nameraných údajov vypočítané ako podiel výkonu dodávaného do záťaže ku výkonu vstupujúceho do obvodu konvertora. To znamená, že uvádzané hodnoty nezohľadňujú vlastnú spotrebu mikrokontroléra a ani stratu pri otváraní tranzistorov z napätia mikrokontroléra. Zariadenie “Matrix MPS-3005L-3” bolo použité ako testovací zdroj. Testovaciu záťaž tvoril resistor.

3.1 Efektivita samostatného konvertora

Cieľom prvého experimentu je overenie modelových výpočtov. Náplňou experimentu je teda sledovanie efektivity konvertora pri rôznych hodnotách parametrov - vstupné napätie, výstupný prúd, frekvencia.

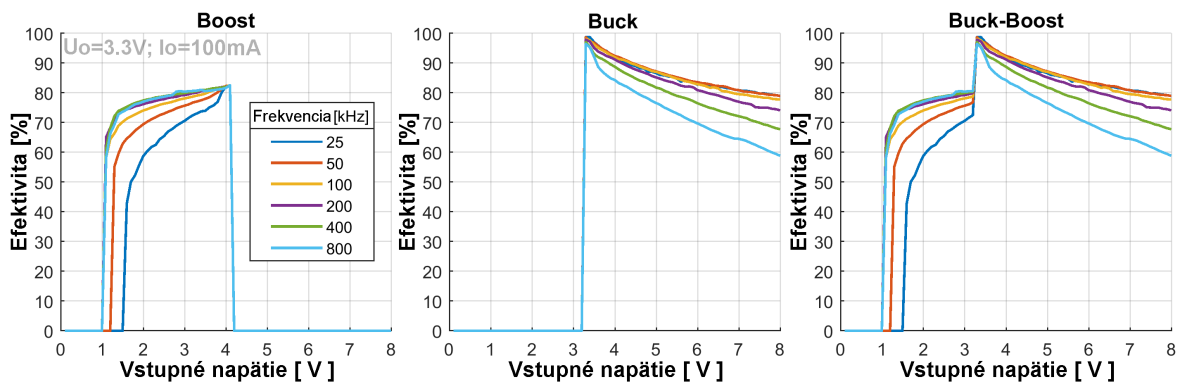
Buck-boost

Prvý konvertor má topológiu buck-boost zo štyrmi spínačmi. Ideálne táto topológia vyžaduje riadenie všetkých štyroch tranzistorov. V tomto meraní sú však riadené len dva (asynchrónne riadenie), pričom tretí je zopnutý len pri zmene medzi buck a boost operáciou. Meranie prebieha pri dvoch úrovniach výstupného prúdu, piatich úrovniach spínacej frekvencie a pri spojitý zmene vstupného napätia od 0V po 8V (obrázky 25 a 26). Keďže topológia vyžaduje odlišné riadenie podľa toho či zväčšuje alebo znižuje napätie, prebiehajú tieto prípady tak tiež osobitne. Namerané dáta oboch prípadov sú potom spojené výberom najvyššej hodnoty efektivity. Špeciálne riadenie pri podobných napätiach na vstupe a výstupe je zanedbané.



Obr. 25: Efektivita Buck-Boost zapojenia zo štyrmi spínačmi pri podmienkach :

$$U_o = 3.3\text{V}; I_o = 10\text{mA}$$



Obr. 26: Efektivita Buck-Boost zapojenia zo štyrmi spínačmi pri podmienkach :

$$U_o = 3.3\text{V}; I_o = 100\text{mA}$$

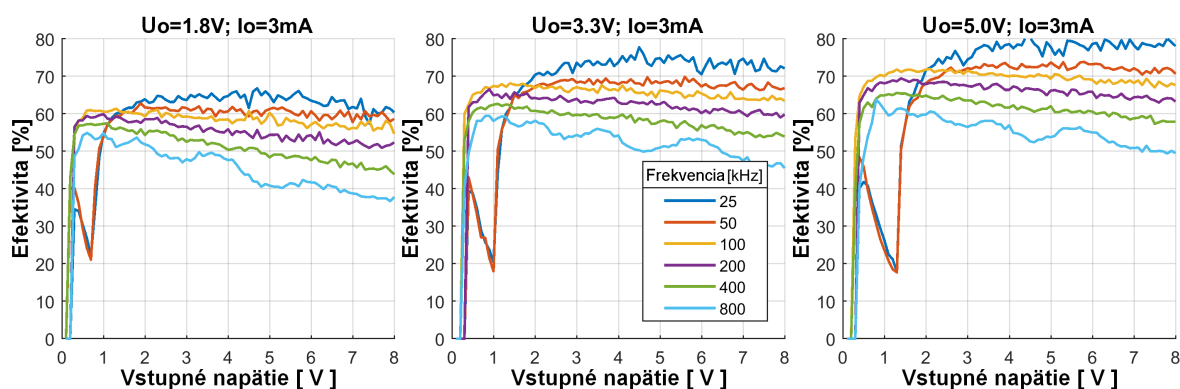
Z grafov vidieť vzťah spínacej frekvencie a efektivity, ktorý pri zmene medzi operáciami buck a boost mení svoj charakter. V boost režime má najnižšia frekvencia najnižšiu efektivitu, zatiaľ čo v buck režime má najvyššia frekvencia najnižšiu efektivitu. Rozdiely medzi krivkami ovplyvňuje aj výstupný prúd. V porovnaní s modelmi majú aj namerané dáta nárast efektivity v oblasti, kde je vstupné napätie blízke výstupnému. Oproti modelom je však tento nárast výrazne strnší, hlavne pri vyššom výstupnom prúde. Túto špičku spôsobuje schopnosť topológie púšťať energiu zo vstupu priamo na výstup bez nutnosti spínania. Počas

merania však obvod spínaný bol, čo spôsobovalo istú stratu nezávislú od výstupného prúdu. Maximálna efektivita tohto vrchola je vyššia pri väčšom výstupnom prúde preto, že spínacia strata tvorí menší podiel z dodávaného výkonu. Za pripomenutie stojí, že nenulové hodnoty v grafe znamenajú dosiahnutie cieľového výstupného napätia a prúdu pri daných podmienkach. Z dát teda vyplýva, že boost režim dokáže fungovať aj ak vstupné napätie presahuje výstupné o menej než je prahová úroveň diódy v tranzistore Q2 (v obrázku 24). Zaujímavá je aj efektivita v tejto oblasti, pretože je pri malej záťaži rovnaká ako pri prepnutí do buck režimu, no pri veľkej záťaži je nezanedbateľne menšia.

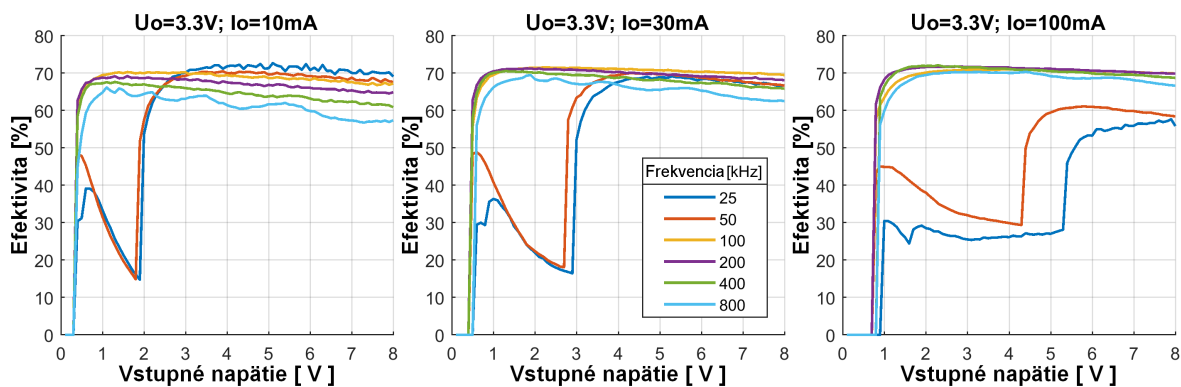
Sepic / Zeta

Ďalší testovaný obvod má topológiu sepic. Modelom opísaná zeta topológia je jej zrkadlovou alternatívou. Jeden obvod teda tvorí obe topológie. Pri experimentálnom meraní stačí v zariadení vymeniť riadenie tranzistorov a vstupné napätie s výstupným. Napriek takejto podobnosti sú ich vlastnosti podstatne odlišné. Hlavne kvôli obmedzujúcim vlastnostiam MOSFET tranzistorov. Zeta topológia oddeľuje vstupné napätie pomocou P-tranzistora, ktorý ako bolo spomínané potrebuje istú úroveň napätia na otvorenie. Obvod teda nie je schopný odoberania energie zo zdroja s napätím pod touto hranicou. Sepic topológia má na vstupne tranzistor typu N, ktorý je otváraný napätím riadiaceho obvodu. Obmedzenie minimálneho vstupného napätia preto prakticky nemá. Neschopnosť otvorenia problematického tranzistor typu P v sepic zapojení nie je problémom, vďaka vstavanej dióde, ktorá je súčasťou každého MOSFET tranzistora. Dióda umožňuje dokončenie spínacieho cyklu prepustením prúdu na výstup aj cez zatvorený tranzistor – čiže bežná asynchrónna prevádzka. Kvôli tomuto obmedzeniu bude ďalej vyhodnocovaná len Sepic topológia.

Obrázky 27 a 28 zobrazujú nameranú efektivitu sepic topológie pri rôznych výstupných napätiach a výstupných prúdoch. Namerané dáta rovnako ako vypočítaný model zobrazujú krivky bez výrazných extrémov, pričom hodnota efektivity kriviek s rastúcou frekvenciou klesá. Oproti modelom však namerané dáta zachytávajú aj podmienky blízko saturácie komponentov, čo je vidieť v krivkách pri najnižších dvoch frekvenciách.

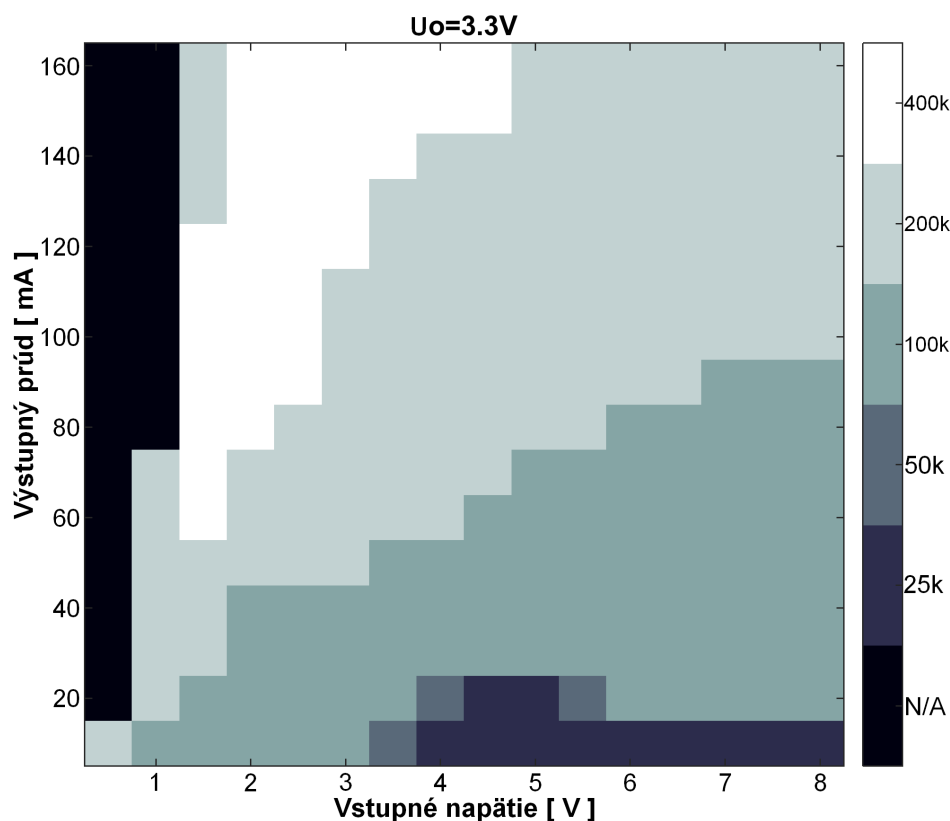


Obr. 27: Efektivita Sepic zapojenia pri konštantnom výstupnom prúde



Obr. 28: Efektivita Sepic zapojenia pri konštantnom výstupnom napätí

Optimálna spínacia frekvencia teda musí byť čo najnižšia kvôli spínacím stratám, no zároveň dosť vysoká na to, aby sa vyhla saturácií komponentov. Obrázok 29 zobrazuje nameraný priestor zaznamenávajúci najlepšiu spínaciu frekvenciu v daných podmienkach. Z priestoru vyplýva, že konštantná spínacia frekvencia nie je z hľadiska efektivity optimálna a že funkcia na určenie optimálnej spínacej frekvencie vyžaduje minimálne dva dynamické parametre.



Obr. 29: Priestor znázorňujúci najlepšiu spínaciu frekvenciu danej oblasti. Hodnota N/A označuje podmienky, pri ktorých obvod nedokázal dosiahnuť požadované napätie.

3.2 Optimalizácia synchronného spínania

Jedným zo spomínaných redukcí priestoru riadiacich veličín je vyňatie a osobitný výpočet riadenia jednej topológie. V krátkom experimente bol na Sepic topológii odmeraný čas výpočtu jedného bodu riadiaceho priestoru vybranými optimalizáciami. Cieľom výpočtu bolo nájsť najefektívnejšie triedy dvoch synchronných signálov pri konštantnom výstupnom napätí (zjednodušená modelová aplikácia zo strany 41). Zjednodušenie zahŕňa vynechanie oneskorení medzi signálmi (t_1 , t_2) a konštantnú hodnotu dĺžky periódy (T). Namerané výsledky v tabuľke 4 zobrazujú čas výpočtu pri nemenných podmienkach prostredia – v tomto prípade vstupné napätie a výstupný prúd. Konštanty boli zvolené nasledovne : $U_i = 1.6V$; $U_o = 3.3V$; $I_o = 100mA$; $f = 200kHz$.

Tabuľka 4: Nameraný čas výpočtu optimalizácie na reálnom zapojení jednej topológie

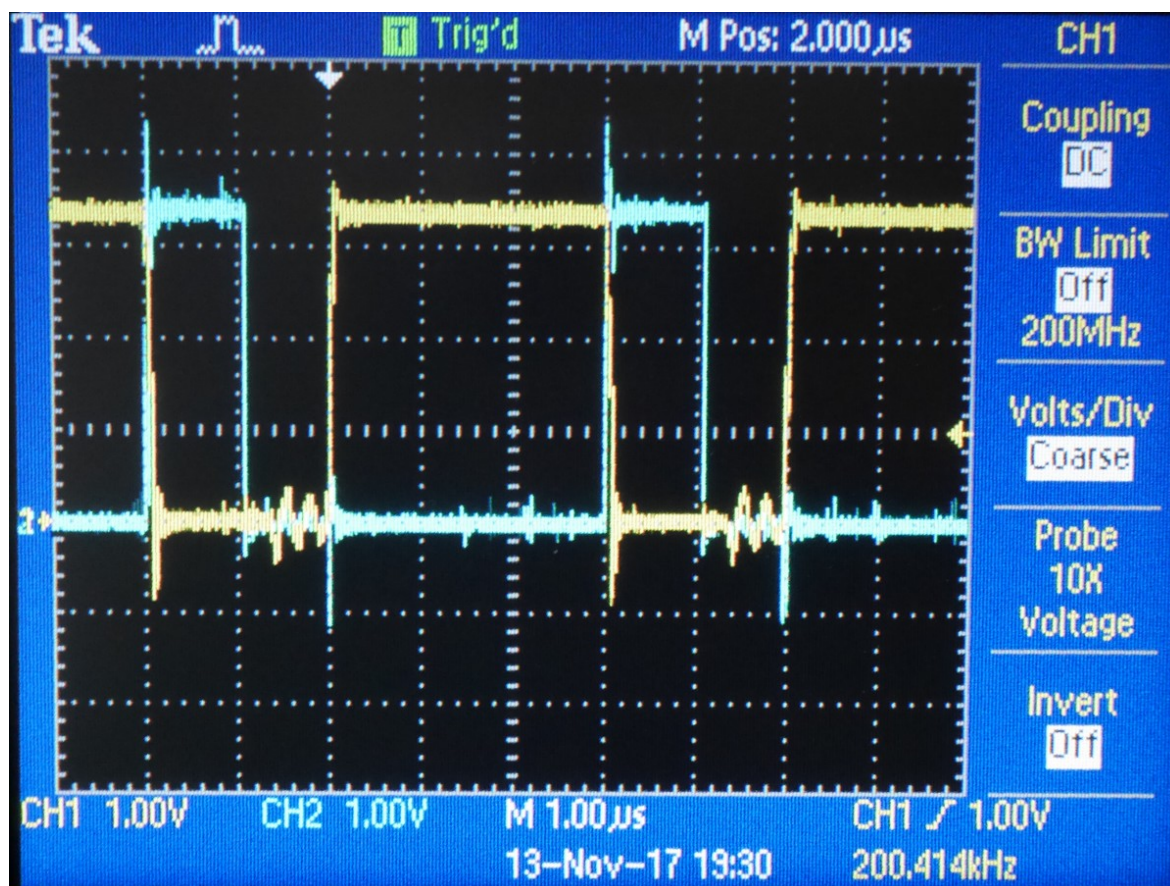
Typ optimalizačnej metódy	Čas ukončenia výpočtu
Brute force	4800sek (1hod 20min)
Hill climbing	16sek
Coordinate descent	30sek
Vlastná metóda	12sek

Rozlíšenie časovača riadiaceho mikrokontroléra rozdeľuje spínaciu periódu na 1280 krokov. Veľkosť optimálnej referenčnej hodnoty získané pomocou „Brute force“ metódy je $D = 746$ krokov pre základný (žltý) signál a $D2 = 265$ krokov pre synchronný (modrý) signál – výsledná efektivita 78.2%. Toto optimum je ilustrované na obrázku 30. Oneskorenia medzi riadiacimi signálmi boli pri testovaní vynechané, nakoľko pre daný obvod nemala ani najmenšia zmena o jeden krok v akomkoľvek smere pozitívny účinok. Hodnoty riadiacich signálov získané z odvodených analytických modelov vychádzajú na $D = 650$ a $D2 = 315$ s celkovou efektivitou 86.1%. Vzhľadom na to, že model nezohľadňuje napäťové straty na komponentoch pri určovaní triedy, je tento rozdiel prijateľný.

Vlastný návrh heuristiky

Pri tomto experimente bola vytvorená heuristika „na mieru“ danému problému. Na základe modelového priestoru je možné predpokladať, že prehľadávaný priestor je hladký s malým počtom lokálnych extrémov. Pre optimalizáciu takéhoto systému môže byť preto výhodné meniť vstupné parametre s väčším krokom, ktorého veľkosť závisí od vzdialenosti aktuálneho výstupného napätia a žiadaného výstupného napätia. Pričom vztáh veľkosti kroku a odchýlky výstupného napätia má priamu úmernosť (veľká odchýlka = veľký krok, malá odchýlka = malý krok). Zvyšok metódy sa podobá na metódu coordinate descent, kde sa menia parametre striedavo. Rozdielom je priorita prvého parametra D , ktorý sa vo svojom

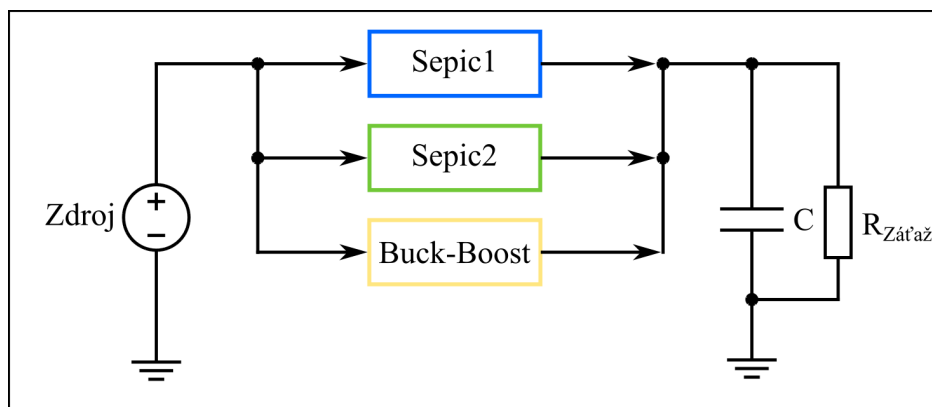
“ťahu” môže meniť, až kým nedosiahne požadovaného výstupného napätia (greedy postup). Po dosiahnutí tohto napätia nasleduje navýšenie parametra D2 o jeden krok, a potom opäť “doregulovanie” parametra D. Tento postup sa opakuje až kým súčet parametrov nedosiahne hodnotu periódy. Takto postavený algoritmus je z testovaných najrýchlejší a zároveň podstatne zriedkavejšie uviazne v lokálnom extréme.



Obr. 30: Výsledok výpočtu spínania synchronného sepic zapojenia.

— 3.3 Rozloženie záťaže v konvertore s paralelnými vetvami —

V tomto experimente sú aplikované opísané optimalizačné metódy na heterogénny paralelný systém (obrázok 31). Tento systém sa skladá z troch vetiev, ktoré spájajú jeden zdroj s jednou záťažou (forma modelovej aplikácie zo sekcie 2.2.2). Vety Sepic1 a Sepic2 používajú rovnakú topológiu konvertora a rovnaký typ induktorov. Odlišujú sa len typom tranzistorov, pričom tranzistory Sepic1 vetvy majú nižšiu parazitnú kapacitu a vyšší parazitný odpor než tranzistory Sepic2 vetvy. Účelom riadenia systému je rozloženie záťaže medzi vetvy tak, aby vznikala čo najmenšia výkonová strata. Merania zachytávajú celkovú efektivitu a rozloženie záťaže pri fixnej spínacej frekvencii 200kHz a rozsahu vstupného napätia od 0.5 do 8 V. Počas merania boli konvertory tohto zapojenia riadené asynchrónne, výpočet teda hľadal hodnoty troch parametrov. Dáta boli získané metódou podobnou k brute force



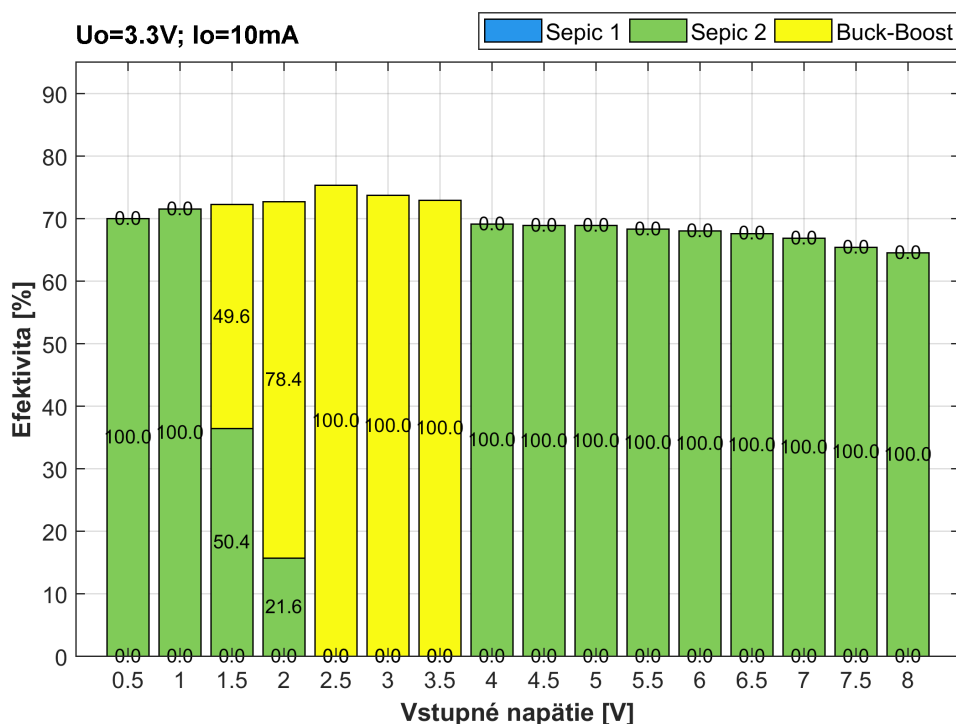
Obr. 31: Bloková schéma zapojenia experimentu s paralelnými vetvami

metóde. Narozdiel od nej ale mení parametre s väčším krokom, čo znamená, že parametre sa nemenili o ich najmenšie rozlíšenie, ale o 8 krokov tohto rozlíšenia. Takto zjednodušený výpočet jedného bodu priestoru trvá zhruba 26 hodín. Obrázok 32 zobrazuje dáta šestnástich takýchto bodov, čiže jeho výpočet trval minimálne 416 hodín (17 dní a 8 hodín). Takýto postup je napriek vysokej časovej náročnosti výpočtu najspol'ahlivejším spôsobom overenia výhodnosti systému ako aj jeho riadenia. Pre praktickú aplikáciu je výhodnejšie použitie inej optimalizačnej metódy. Implementácia výhodnejších optimalizačných metód nie je triviálna, nakoľko je komplikovaná rôznymi problémami. Tie sú často špecifické konkrétnej metóde či systému. Počas experimentov boli spozorované nasledovné komplikácie :

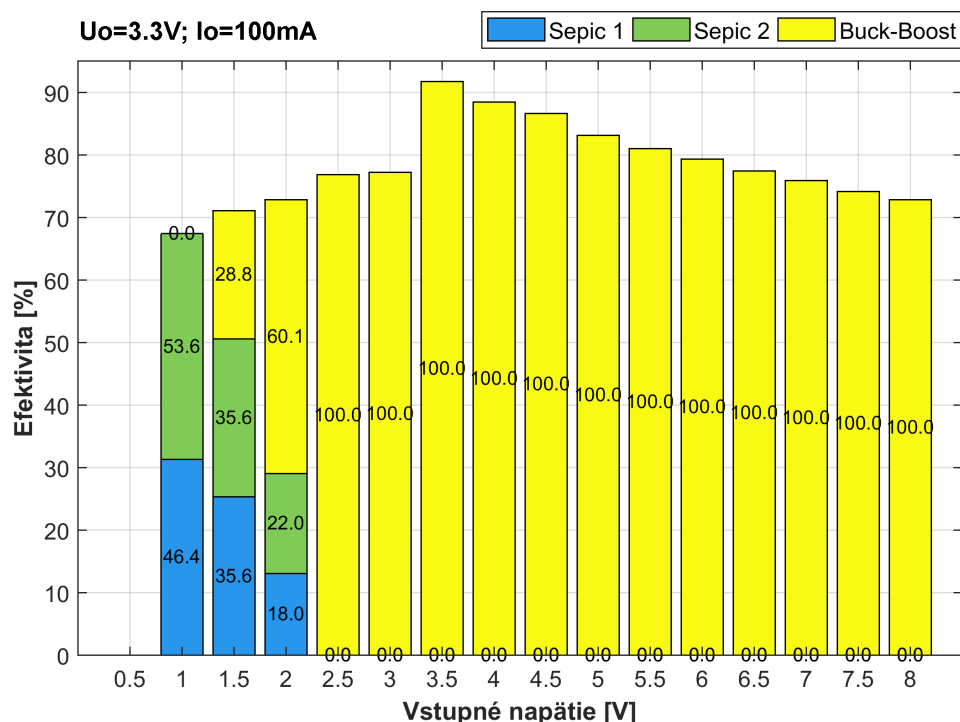
- Čas ustálenia – Výpočet aktuálnej hodnoty účelovej funkcie trvá zanedbateľný čas v porovnaní k času ustálenia systému po reakcii na nové riadiace veličiny. Čas potrebný na ustálenie však nie je konštantný. Mení sa v závislosti od veľkosti zmeny na výstupe systému. Metódy, ktoré prehl'adávajú malé okolie (brute force, hill climbing) potrebujú menší čas na ustálenie ako metódy skákajúce po veľkých krokoch (simulované žihanie).
- Vzťah riadiacich veličín – Podmienky optimalizácie dotvárajú vzájomný vzťah riadiacich veličín. To znamená, že pre splnenie podmienok musí byť pri zvýšení hodnoty jednej riadiacej veličiny znížená iná riadiaca veličina. Metódy, ktoré menia len jednu veličinu v jednej iterácii (coordinate descent, niektoré implementácie metódy hill climbing) sú preto časovo neefektívne a majú väčšie riziko uviaznutia v lokálnom minime.
- Šum – Hodnota účelovej funkcie vychádza z niekoľkých elektrických veličín. Tie sú ovplyvňované šumom, čo sa prejavuje aj v účelovej funkcii. Z toho dôvodu metódy prehliadávajúce priestor po malých krokoch môžu nesprávne porovnať dve riešenia s blízkou hodnotou.
- Nutnosť overenia vplyvu parametra – Výsledok merania je nutné overiť špeciálnym algoritmom, ktorý overí, že zmena každého parametra spôsobí zmenu účelovej funkcie. Táto akcia je nutná nakoľko môžu nastať prípady, kedy hodnota istého parametra nemá priamy vplyv na účelovú funkciu, no napriek tomu znižuje kvalitu systému iným

smerom. Napríklad topológie, ktorých otvorenie tranzistorov je závislé od spínaného napätia, by pri nízkom vstupnom napätí boli spínané zbytočne. Vplyvom šumu sa ale môže zdať, že istá strieda spínania je výhodnejšia než sú iné, a tak výsledné riešenie nadobudne nenulovú hodnotu tohto parametra. Hoci je hodnota straty zbytočného spínania obvodu pod úrovňou šumu, znižuje kvalitu systému generovaním ďalšieho šumu, a preto je nutné takéto prípady identifikovať a potlačiť.

Namerané dáta na obrázkoch 32 a 33 zobrazujú najlepšiu dosiahnuteľnú efektivitu systému pri definovaných podmienkach a podiel aktivity vetiev pri týchto podmienkach. Výška stĺpcov zobrazuje efektivitu systému. Podiely vetiev sú zobrazené nielen farebným rozdelením stĺpcov, ale aj číslom, ktoré reprezentuje percentový podiel danej vetvy. Charakter úlohy avšak nevyklučuje možnosť dosiahnutia rovnakej efektivity pri rôznych rozdeleniach zát'aže. Predovšetkým rozdelenia pri vyššom výstupnom prúde majú viacero alternatív. Na grafoch vidieť, že pri malom výstupnom prúde je takmer výlučne najvýhodnejšie spínať len jeden konvertor. Pri vyššom výstupnom prúde je výhodná zmes všetkých troch vetiev až do bodu, kedy je buck-boost zapojenie výrazne výhodnejšie než ostatné vetvy. Oblasť vysokej efektivity tejto topológie odpovedá hodnotám nameraných pri testovaní rôznych frekvencií v časti 3.1. Na základe vyššej aktivity vetvy Sepic2 než Sepic1 sa dá povedať, že pri zvolenej spínanej frekvencii 200kHz sú výhodnejšie tranzistory s nižším parazitným odporom než tie s nižšou parazitnou kapacitou.



Obr. 32: Nameraná efektivita a aktivita vetiev paralelného systému pri výstupnom napätí 3,3V a prúde 10mA

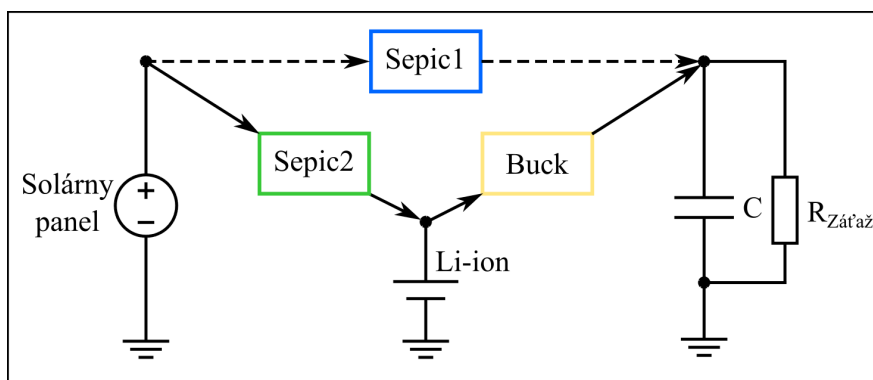


Obr. 33: Nameraná efektivita a aktivita vetiev paralelného systému pri výstupnom napätí 3,3V a prúde 100mA

3.4 Riadenie zberu energie z prostredia

Na koniec ostáva overiť schopnosť riadiaceho algoritmu pracovať s heterogénnymi zdrojmi, ktoré majú špecifické požiadavky. V experimente je použitý solárny (fotovoltaický) článok ako zdroj energie a lítiový akumulátor ako úložisko energie. Účelom riadenia je odoberať čo najviac energie zo solárneho článku a smerovať túto energiu buď do akumulátora alebo do zát'aže. V takomto systéme môže nastať situácia, kedy solárny článok nedokáže dodať dostatok energie na splnenie požiadaviek zát'aže. V takomto prípade musí byť chýbajúca energia doplnená z akumulátora. Bežne je takáto funkcionálna zabezpečená dvoma konvertormi (zelený a žltý blok na obrázku 34). Pri takomto riešení ale musí energia zo solárneho panelu prejsť oboma konvertormi, čo zvyšuje stratu. Doplnenie tretieho obvodu, ktorý spája solárny článok so zát'ažou priamo (modrý blok) tejto strate predíde. Zároveň ale komplikuje riadenie, čo je problém, ktorý sa navrhovaný algoritmus snaží vyriešiť. Samotné meranie znamená podiel aktivity jednotlivých vetiev v závislosti od výkonu požadovaného zát'ažou pri konštantnom napätí 3,3V. Meranie prebieha počas konštantného osvetlenia solárneho článku, pri ktorom bolo namerané maximum dodávaného výkonu v hodnote **14 mW** pri napätí 2,54V. Počas merania bol použitý špeciálny riadiaci algoritmus, ktorý začína hľadáním maximálneho výkonu solárneho článku pomocou "perturb and observe" metódy. Následne na základe porovnania výstupného napätia a jeho požadovanej hodnoty začne dodávať prebytočnú energiu do akumulátora alebo odoberať z neho chýbajúcu, až kým nie je dosiahnuté požadované výstupné napätie. Nájdenie riešenia pomocou tohto algoritmu trvá približne 10 sekúnd.

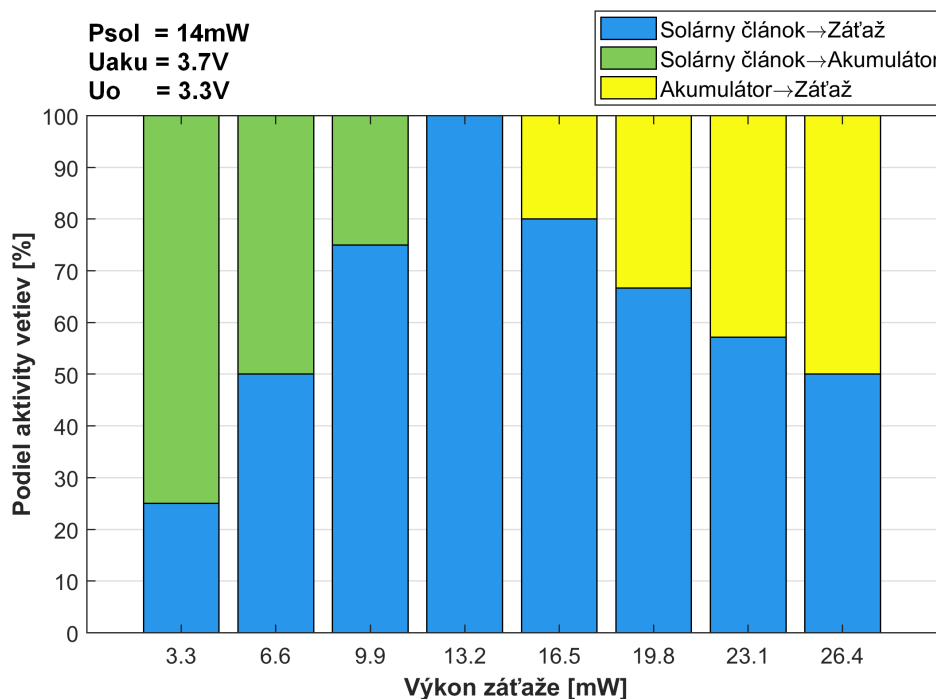
Rýchly priebeh merania je dôležitý, aby meranie neovplyvňovali meniace sa parametre akumulátora. Akumulátor používa Li-Ion technológiu s výrobcom doporučeným pracovným rozsahom napätia od 2,75V do 4,2V. Napätie akumulátora počas merania bolo 3,7V.



Obr. 34: Bloková schéma zapojenia experimentu s heterogénnymi zdrojmi

Namerané dáta (obrázok 35) zobrazujú tri oblasti podľa toho, či energia zo solárneho článku:

1. Prevyšuje požiadavky zát'aže a jej zvyšok je ukladaný do akumulátora (stĺpce modrej a zelenej).
2. Tesne pokrýva požiadavky zát'aže pričom je prebytok tak malý, že nie je výhodné snažiť sa ho ukladať (stĺpce modrej).
3. Nepokrýva požiadavky a rozdiel je odoberaný z akumulátora (stĺpce modrej a žltej).



Obr. 35: Namerané rozdelenie aktivity vetiev systému pri premenlivom výkone zát'aže

3.5 Zhrnutie výsledkov experimentov

Na základe experimentálnych meraní je možné odvodiť niekoľko nasledovných poznatkov o heterogénnom paralelnom systéme správy napájania a jeho navrhovanom spôsobe riadenia. Poznatky môžu byť užitočné pri implementácii či ďalšom výskume spomínaného systému.

- **Model či reálny systém** — Medzi analyticky vypočítanými hodnotami energetickej účinnosti a hodnotami nameranými na reálnom zapojení je podľa očakávania rozdiel. Hodnoty účinnosti z analytických vyjadrení sú vyššie z dôvodu početných zaokrúhlení a zjednodušovaní. Tieto dáta avšak zdieľajú tvar priestoru a trendy v ňom. Napríklad v priestoroch získaných oboma metódami nájdeme špičku v efektívite buck-boost zapojenia v oblasti, kde je vstupné napätie podobné výstupnému. Ďalej aj sepic zapojenie je najviac ovplyvňované spínacou frekvenciou v oboch priestoroch, a spoločná je aj závislosť efektivity od požadovaného výstupného napätia. Pomocou nepresného analytického modelu sa nedá určiť hodnota efektivity systému, dá sa určiť len približný tvar krivky tejto efektivity.
- **Vlastnosti obvodov** — Meraniami bolo potvrdené, že konštantný charakter niektorých vlastností DC-DC meničov (napr. frekvencia) nie je z hľadiska efektivity výhodný. Ich dynamický charakter je na druhej strane problém implementovať do súčasného spôsobu riadenia. Navrhovaný systém a riadenie predstavujú zlepšenie v tejto oblasti. Ovládače spínaných tranzistorov nie sú o nič menej dôležité. Počas meraní boli práve ovládače tranzistorov buck-boost či zeta topológií podstatným faktorom vplyvujúcim na výslednú efektívnosť topológie. Ovládače tranzistorov ovplyvňujú čas zmeny stavu tranzistora (otvorenie/zatvorenie), no nedokonalý návrh ovládačov môže spôsobovať nezanedbateľnú stratu energie aj pri konštantnej úrovni tranzistora či zvyšovať minimálne napätie potrebné k jeho otvoreniu. Tieto vlastnosti je následne potrebné zohľadniť pri návrhu systému.
- **Optimalizácia** — Táto práca sa príliš nezaoberala návrhom výhodnej optimalizačnej metódy. Hlavným dôvodom je špecifickosť výhodnosti jednotlivých metód vo vzťahu k priestoru, ktorý prehl'adáajú. V testovaných priestoroch je možné identifikovať niekoľko dôležitých vlastností, ktoré by optimalizačné metódy mali zohľadňovať. Najdôležitejšou z nich je nutnosť čakania na reakciu reálneho systému. To znamená, že metódy založené na množstve iterácií a minime výpočtov sú menej výhodné ako tie, ktoré radšej strávia viac času výpočtom a realizujú menej iterácií. Čakanie na systém obmedzuje aj metódy, ktoré realizujú veľké skoky v hodnotách parametrov. Pri malých zmenách je ustálenie systému rýchlejšie než pri veľkých skokoch. Za účelom zníženia počtu iterácií môže byť pre optimalizačnú metódu výhodné kombinovať numerické metódy a analytickými.

- Riadiaci algoritmus – V samotnom riadiacom algoritme je dôležitý tvar účelovej funkcie, ktorá porovnáva výhodnosť nastavenia systému. Táto funkcia musí zohľadňovať rušivé vplyvy reálneho prostredia ako šum, zvlnenie či presnosť elektrických hodnôt. Z toho dôvodu môže byť výhodnejšie definovať požadované hodnoty v intervaloch namiesto presných čísel. Meraniami potvrdená schopnosť riadiaceho algoritmu prispôbiť sa hardvéru ešte nezaručuje efektívny systém. Nevhodne zvolené vetvy či ich obvody môžu znižovať efektivitu. Tento problém je možné riešiť odoslaním vyplneného riadiaceho priestoru na výkonnejší vzdialený počítač, ktorý by analýzou priestoru vedel určiť spôsob zlepšenia zapojenia.

Záver

Prezentovaný spôsob riadenia má potenciál byť súčasťou moderného “sveta zajtrajška”, v ktorom presnosť riadenia systémov nie je obmedzená presnosťou konštant analytických modelov. Adaptácia riadenia na premenlivé podmienky je dôležitou súčasťou moderných systémov a môže mať mnoho podôb. Niektoré z nich sa používajú už desaťročia - napr. prispôsobovanie zosilnenia spätnej väzby. Rovnaké riešenia už ale nestačia na rastúce požiadavky presnosti, rýchlosti či energetickej účinnosti. Slučku analógového regulátora už často dopĺňa a niekedy nahradzuje číslicové riadenie. Číslicové riadenie umožňuje softvérové riešenie problémov, ktorých hardvérové riešenie je komplikované či až nemožné. Softvérové algoritmy strojového učenia sú v súčasnosti výhodou perspektívou adaptívneho riadenia, vďaka schopnosti riadenia rozsiahlych a komplikovaných systémov.

Prezentovaný algoritmus je jedným príkladom adaptívneho riadenia založenom na strojovom učení. Algoritmus nemá žiadne analytické vyjadrenie na priame určenie riadiacich veličín. K dispozícii má len zoznam požiadaviek na riadenie a spätnú väzbu zo všetkých vlastností systému. Ako nastaviť riadiace veličiny, aby boli splnené všetky požiadavky sa algoritmus musí najprv “naučiť”. Pred bežnou operáciou je potrebné systém umiestniť do testovacieho prostredia, v ktorom prebehne učenie. V rámci neho algoritmus získa potrebné kombinácie hodnôt riadiacich veličín vo vzťahu ku kombináciám externých veličín z definovaného rozsahu. Pre jednoduché systémy, ktorým stačí monotónna reakcia regulátora, je takýto spôsob riadenia zbytočný. Naopak komplexné systémy môžu takýmto spôsobom nájsť výhodné riešenia s minimom ľudského úsilia. Učenie môže v obmedzenej miere pokračovať počas bežnej prevádzky systému, čo umožní adaptáciu voči zmene vlastností systému. Pri učení počas behu bude dochádzať k odchýlkam parametrov od ich požadovaných hodnôt. Algoritmus by mal ovládať veľkosť týchto odchýliek tak, aby to nebol problém pre riadený systém. Pre niektoré systémy však môžu byť premenlivé parametre riadenia kritický problém, čo potom obmedzuje ich adaptáciu za behu. Kľúčové vlastnosti celého algoritmu boli testované na matematických modeloch ale aj na reálnom systéme. Matematické modely obvodov konvertorov v práci potvrdzujú nie len výhodnosť použitia heterogénneho paralelného systému do oblasti správy napájania, ale aj výhodnosť prezentovaného algoritmu do tejto aplikácie. Testovanie na reálnom systéme ale zachytáva aj rozptyl vlastností komponentov, šum, zmenu teploty vplyvom operácie, zmenu parazitných kapacít vplyvom prítomnosti užívateľa a iné rušivé vplyvy. Napriek tomu vykazujú namerané dáta rovnaké kľúčové vlastnosti ako vypočítané priestory. Z týchto hľadísk je porovnanie analytických modelov a reálneho systému na elektrotechnickom zapojení výhodné.

Potenciálnym zlepšením vo vlastnostiach prezentovaného riadenia je vývoj elektroniky, ktorá umožňuje kombináciu analógového a digitálneho riadenia. Táto idea je v práci spomenutá, no jej implementácia nie je triviálna. Návrh kombinovaného systému, ktorý využíva len pozitíva oboch princípov, potláča ich negatíva a zároveň garantuje stabilitu systému, je sám o

sebe komplexný problém. Prezentované riadenie tiež podporuje výskum a aplikáciu nových atypických zapojení konvertorov, ktoré sú výhodné len za veľmi špecifických podmienok. Zapojenia, ktorých vlastnosti sú vo väčšine prípadov nevýhodné by inak neboli schopné tvoriť samostatný konvertor. Ak však existujú podmienky, kedy je zapojenie výhodnejšie než všetky ostatné, tak môže tvoriť užitočnú časť heterogénneho paralelného systému napájania. V neposlednom rade prezentované riadenie špecifikuje nové požiadavky do vývoja optimalizačných metód. V súčasnosti optimalizačné metódy používajú iteračné postupy s mnohými iteráciami, alebo sa snažia získať riešenie z analytického vyjadrenia. Tieto postupy sú zriedkavo kombinované, čo by mohlo viesť k iteračným metódam s nízkym počtom iterácií. Tieto metódy budú potrebné pre optimalizáciu reálnych systémov, ktoré nie je výhodné či možné simulovať. V súčasnosti je málo aplikácií, kde by mohli byť optimalizačné metódy s nízkym počtom iterácií výhodné. Rozširovanie robotiky či riadenia za pomoci učiacich sa systémov v najbližších rokoch zvýšia počet aplikácií, ktorých čas výpočtu optimalizácie je zanedbateľný oproti času potrebnému na odmeranie reakcie systému.

Prínos tejto práce pre vedu a prax je možné zhrnúť nasledovne :

- Vývoj metódy pre riadenie heterogénnych paralelných systémov bez analytickej charakteristiky.
- Aplikovanie heterogénneho paralelného systému do oblasti DC-DC meničov.
- Možnosť uplatnenia :

Optimalizačných metód kombinujúcich analytické vyjadrenia s iteračnými postupmi

Optimalizačných metód s nízkym počtom iterácií

Atypických obvodov DC-DC meničov

Použitá literatúra

- [1] Evans, D. Apríl 2011. „The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything“. [online]. Cisco white paper.
- [2] Yildiz, Faruk. Október 2009. „Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques“. In “Journal of technology studies“. 2009, Vol. 35, Issue 1, p 40.
- [3] R. Faranda – S. Leva. Jún 2008. “Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems,” In “WSEAS Transactions on Power Systems“. Issue 6, Volume 3, June 2008. ISSN 1790-5060.
- [4] Pervez Hameed Shaikh, Nursyarizal Bin Mohd. Nor, Irraivan Elamvazuthi and Perumal Nallagownden. August 2013. „Maximum Power Point Tracking (MPPT) of Partially Shaded Photovoltaic Cells: A Technical Review“. In book: „Materials and Processes for Energy: Communicating Current Research and Technological Developments“, Edition: 1, pp.75-83.
- [5] Sanyo. Júl 2008. „UR18650A Specifications“. Katalógový list Li-ion akumulátora. [online]. (citované – August 2016).
- [6] Sambeet Mishra – Pratyasha Tripathy. August 2012. Solar Thermal Electricity Generating System. In International Journal of Advancements in Research & Technology. Volume 1, Issue 3, August-2012, ISSN 2278-7763.
- [7] Williams, J. – Nelson, C. Jún 1986. „Application Note 19 - LT1070 Design Manual“.
- [8] Jae-Eul Yeon. 2009. „AN-8025 Design Guideline of Single-Stage Flyback AC-DC Converter Using FAN7530 for LED Lighting“. [online]. Rev. 1.0.2 • 8/5/10
- [9] Zainal Salam – Jubaer Ahmed – Benny S. Merugu. Jún 2013. „The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review“. In “Applied Energy 107 (2013)“. pg. 135–148.
- [10] Kai Sun – Longxian Ni – Min Chen – Hongfei Wu – Yan Xing – Lasse Rosendahl. Apríl 2013. „Evaluation of High Step-Up Power Electronics Stages in Thermoelectric Generator Systems“. In „Journal of Electronic Materials“. July 2013, Volume 42, Issue 7, pp 2157–2164.
- [11] Walt Kester – Walt Jung – Brian Erisman – Gurgit Thandi. 1998. „Practical Design Techniques for Power and Thermal Management“. Analog Devices, 1998, ISBN-0-916550-19-2.
- [12] S. Castillo – N. K. Samala – K. Manwaring – B. Izadi – D. Radhakrishnan. Jún 2004. „Experimental Analysis of Batteries under Continuous and Intermittent Operations“.

In "Proceedings of the International Conference on Embedded Systems and Applications". June 2004. pp. 18 – 24.

- [13] Martin Winter – Ralph J. Brodd. September 2004. „What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors? “. In „Chemical Reviews“. Vol. 104, No. 10, p 4245–4269.
- [14] Eric Rutten. Júl 2008. „Reactive control of adaptive embedded systems“. In „Research Report RR-6604“, 2008, pp.20. ISSN 0249-6399
- [15] Junhong Zhang. 2008. „Bidirectional DC-DC Power Converter Design Optimization, Modeling and Control“. Dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. January 2008. (citované – August 2016)
- [16] Mousavi Ahmad. 2013. "Soft-Switching DC-DC Converters". Electronic Thesis and Dissertation Repository. Paper 1435. (citované – August 2016)
- [17] S. Chonsatidjamroen – K-N. Areerak – K-L. Areerak. 2011. „Dynamic Model of a Buck Converter with a Sliding Mode Control“. In „International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering“ Vol:5, No:12, 2011. (citované – August 2016)
- [18] Michael Douglas Seeman. 2009. "A Design Methodology for Switched-Capacitor DC-DC Converters". A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY. Spring 2009. (citované – August 2016)
- [19] Andrea Schaerf – Yoav Shoham – Moshe Tennenholtz. 1995. „Adaptive Load Balancing: A Study in Multi-Agent Learning“. In „Journal of Artificial Intelligence Research 2“. (1995) pg. 475-500 (citované – Jún 2016)
- [20] Silicon Labs. 2015. „TS3310/12/14 Data Sheet“.[online] Revision 1.0. February 2016. (citované – August 2016)
- [21] X-Powers Limited. 2010. „DATASHEET AXP209 Enhanced single Cell Li-Battery and Power System Management IC“. [online] (citované – Jún 2016)
- [22] Kataógové listy obvodov od spol. Linear Technologies. [online] (citované – Júl 2016): LTC3104 – REV A. Jul 2016; LTC3300 - REV B. Dec 2013; LTC 3106 - 2015; LTC3109 - REV B. Aug 2013; LTC3330 - REV C. Aug 2015; LTC3331 - REV C. Aug 2015; LTC4417 - 2012; LTC3652 – REV E. Dec 2015; LTC4121 – REV C. Feb 2016; LTC8490 – REV A. Nov 2015; Dostupné na stránkach výrobcu. <<http://www.linear.com/>>
- [23] Kataógové listy obvodov od spol. Texas Instruments. [online] (citované – Júl 2016): TPS62770 – SLIS165D. DECEMBER2014 – REVISED APRIL2016; BQ25504 –

SLUSAH0C. OCTOBER2011 – REVISED JUNE2015; BQ25505 – SLUSB3D. AUGUST2013 – REVISED FEBRUARY2015; BQ25570 – SLUSBH2E. MARCH2013 – REVISED MARCH2015; Dostupné na stránkach výrobcu. <<http://www.ti.com/>>

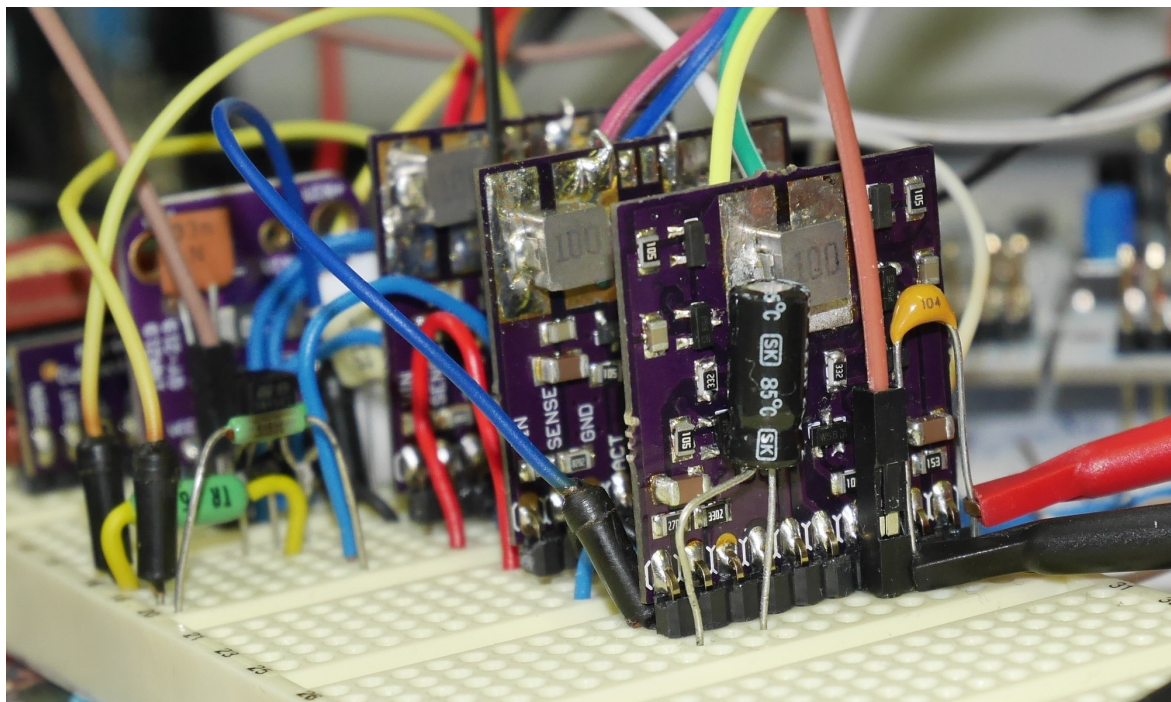
- [24] Štatictické dáta zo stránky: <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/overview/>
- [25] Hamley, John A. NASA Glenn Research Center. 2016. „Radioisotope Power Systems Program: A Program Overview“. [online]. Feb 23, 2016 .
- [26] Rehman, Zubair. Al-Bahadly, Ibrahim. Mukhopadhyay, S.C.. 2015. „Multiinput DC–DC converters in renewable energy applications – An overview“. In „Renewable and Sustainable Energy Reviews“. 41. 521–539. 10.1016/j.rser.2014.08.033.
- [27] Lara-Salazar, G & Vazquez, N & Hernandez, C & Lopez, H & Arau, Jaime. (2016). Multi-input DC/DC converter with battery backup for renewable applications. 47-51. 10.1109/CIEP.2016.7530729.
- [28] HRISHIKESH NENE. Texas Instruments. 2015. „TI Designs: TIDA-BIDIR-400-12 Bi-directional DC-DC Converter“. TIDUAI7–September2015
- [29] Abas Goodarzi. Sudip Mazumder. 2008. „Bi-directional dc-dc Converter - Including Vehicle System Study to determine Optimum Battery and DC Link Voltages“. February 28, 2008.
- [30] Fai Lee, Cheung & Mok, Philip. 2004. „A monolithic current-mode CMOS DC-DC converter with on-chip current-sensing technique“. Solid-State Circuits, IEEE Journal of. 39. 3 - 14. 10.1109/JSSC.2003.820870.
- [31] Sanjaya Maniktala. 2012 „TN-206 Voltage-Mode, Current-Mode (and Hysteretic Control)“. Microsemi Corp. July 2012.
- [32] Robert Mammano. 1994. „Switching Power Supply Topology Voltage Mode vs. Current Mode“. Unitrode design note 62. June 1994.
- [33] Zaman, Ahsan & Prodic, Aleksandar & A. Johns, David. 2015. An Integrated High-Density Power Management Solution for Portable Applications Based on a Multi-output Switched-Capacitor Circuit. IEEE Transactions on Power Electronics. 31. 1-1. 10.1109/TPEL.2015.2474738.
- [34] Fatih Cingoz & Ali Elrattyah & Yilmaz Sozer. „Optimized Droop Control Parameters for Effective Load Sharing and Voltage Regulation in DC Microgrids“. In „Electric Power Components and Systems“. vol 43. num 8-10. pg 879-889. 2015.
- [35] Emanuele Frandi. & Alessandra Papini. „Coordinate Search Algorithms in Multilevel Optimization“. In „Optimization Methods and Software“. vol 29. num 5. pg 1020-1041. 2014

- [36] Nuaimi, Klaithem & Mohamed, Nader & Alnuaimi, Mariam & Al-Jaroodi, Jameela. 2012. A Survey of Load Balancing in Cloud Computing: Challenges and Algorithms. Proceedings - IEEE 2nd Symposium on Network Cloud Computing and Applications, NCCA 2012. 137-142. 10.1109/NCCA.2012.29.
- [37] Branko Radojević & Mario Žagar. 2011. „Analysis of Issues with Load Balancing Algorithms in Hosted (Cloud) Environments“. Proceedings of the 34th International Convention MIPRO, Opatija, 2011, pp. 416-420.
- [38] Sandeep Sharma, Sarabjit Singh, Meenakshi Sharma. 2008. „Performance Analysis of Load Balancing Algorithms “. World Academy of Science, Engineering and Technology 14 2008. pg 269-272.
- [39] STMicroelectronics. 2007. „AN2435 Application note - TM sepic converter in PFC pre-regulator“. rev1 March 2007.
- [40] N. S., Jayalakshmi & Gaonkar, Dattatraya & Naik, Amrut. 2017. Design and Analysis of Dual Output Flyback Converter for Standalone PV/Battery System. International Journal of Renewable Energy Research. 07. 1032-1040.
- [41] Coelho, Roberto Francisco. Martins, Denizar Cruz. 2012. „An Optimized Maximum Power Point Tracking Method Based on PV Surface Temperature Measurement“. In „Sustainable Energy - Recent Studies“. 2012. chapter 4.
- [42] Pedro Amaral. 2015. Adaptive High Resolution Dead-Time Algorithm for Energy Efficiency in Power Converters.
- [43] Laszlo Balogh. 2017. Design And Application Guide For High Speed MOSFET Gate Drive Circuits
- [44] Mark Dennis. Fairchild Semiconductor. 2013. „AN-6069 Application Review and Comparative Evaluation of Low-Side Gate Drivers“. rev-1.0.4. 12/9/13
- [45] Lingyin Zhao. Jinrong Qian. Texas Instruments. 2006. „DC-DC Power Conversions and System Design Considerations for Battery Operated System “. Texas Instrument Seminar. (May 2006). [Online]
- [46] All About Circuits.com Editorial Team. 2015. „Discontinuous Conduction Mode of Simple Converters“. June 11, 2015. [online]
- [47] Mathew Wich. Fu Sun. 2014. „The Low Output Voltage Ripple Zeta DC/DC Converter Topology“. Linear technology solutions.
- [48] Elena Niculescu. Dorina Mioara-Purcaru. Marius-Cristian Niculescu. Ion Purcaru. Marian Maria. „A Simplified Steady-State Analysis of the PWM Zeta Converter“. Proceeding ICC'09 Proceedings of the 13th WSEAS international conference on Circuits. Pages 108-113. Rodos, Greece — July 22 - 24, 2009

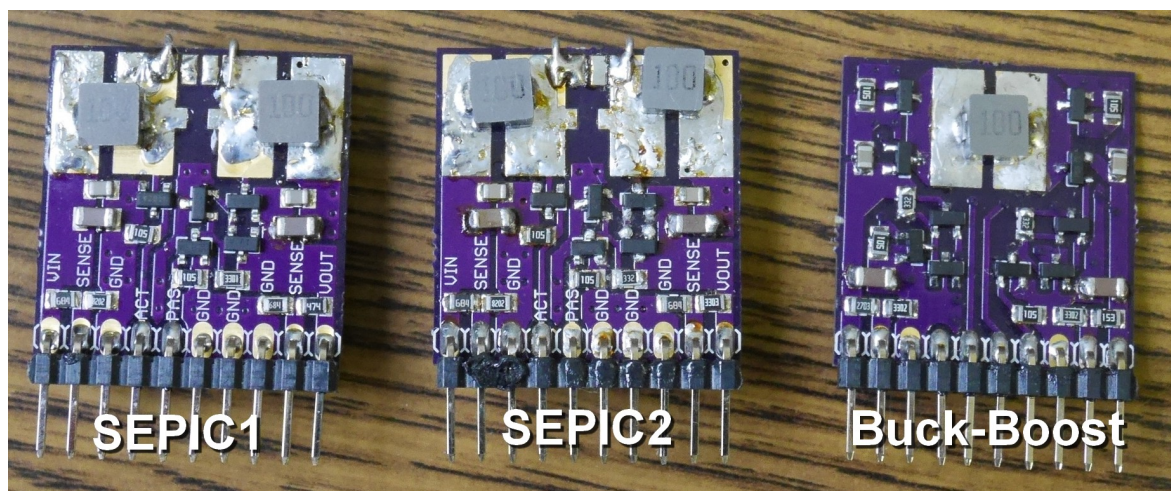
- [49] Song, Min-Sup & Son, Young-Dong & Lee, Kwang-Hyun. 2014. „Non-isolated Bi-directional Soft-switching SEPIC/ZETA Converter with Reduced Ripple Currents”. „Journal of Power Electronics”. p 649-660.
- [50] Faizan Hameed. Khalid Iqbal. 2016. „ZETA Converter based charge controller for efficient use of solar energy in street lighting system”. In „International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering”. Vol 5. Issue 6. June 2016.
- [51] STMicroelectronics. 2014. „AN4449 Application note - Buck-boost converter using the STM32F334 Discovery kit“. rev1 September 2014.
- [52] Gregory Manlove. 2012. „Dual Output DC/DC Controller Combines Digital Power System Management with Analog Control Loop for $\pm 0.5\%V_{OUT}$ Accuracy”. In : „LT journal of analog innovation”. Vol 21 Num 4. January 2012. [online]
- [53] M, Hewitson. 2010. „Digital Vs Analog control”. GEO ISC Meeting. Hannover, Feb 2010. [online]
- [54] Brian T. Lynch. „Under the Hood of a DC/DC Boost Converter“. Texas Instruments Power Supply Design Seminar, pp. 3.1–3.26, 2008-2009
- [55] Everett Rogers. Texas Instruments. „Understanding Boost Power Stages in Switchmode PowerSupplies”. Application Report SLVA061. March 1999
- [56] Everett Rogers. Texas Instruments. „Understanding Buck Power Stages in Switchmode PowerSupplies”. Application Report SLVA057. March 1999
- [57] Anthony Fagnani, TI Literature Number SLVA559, „Application Report Isolated Continuous Conduction Mode Flyback Using the TPS55340”, January 2013
- [58] ON Semiconductor. "How to Keep a FLYBACK Switch Mode Supply Stable with a Critical-Mode Controller". Application note AN1681/D. Rev 1. May 2017.
- [59] Jeff Falin. "Designing DC/DC converters based on SEPIC topology". Texas Instruments. Analog Applications Journal. 4Q 2008
- [60] Jeff Falin. "Designing DC/DC converters based on ZETA topology". Texas Instruments. Analog Applications Journal. 2Q 2010
- [61] Rosario Attanasio. „500 W fully digital AC-DC power supply based on the STM32F334 microcontroller“. STMicroelectronics. Application note AN4468. June 2014.
- [62] Peter Ševčík. Oldřich Kovář. “Power unit based on supercapacitors and solar cell module”. In “SCIECONF 2013 : the 1st international virtual scientific conference : 10.-14. June 2013 : proceedings in scientific conference.” ISSN 1339-3561. - Žilina: University of Zilina, 2013. - ISBN 978-80-554-0726-5. - S. 468 - 471.

- [63] Michal Kochláň. Juraj Miček. Martin Hyben. “Wireless sensor network energy harvesting : radio frequency harvesting case study”. In “Intelligent transportation systems 2013 : virtual conference : August 26-30, 2013”. ISSN 1339-4118. - Žilina: Žilinská univerzita, 2013. - ISBN 978-80-554-0763-0. - CD-ROM, s. 93-97.
- [64] Michal Kochláň. Peter Ševčík. “Supercapacitor power unit for an event-driven wireless sensor node”. In “FedCSIS : proceedings of the Federated conference on computer science and information systems : September 9-12, 2012, Wrocław, Poland”. - [S.l.]: IEEE, 2012. - ISBN 978-83-60810-51-4. s. 791-796.
- [65] Mei, L. (2012). “A predictive analog dead-time control circuit for a high efficiency synchronous buck converter”. University of British Columbia.
- [66] Weidong Xiao and W. G. Dunford, “A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems,” 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), 2004, pp. 1957-1963 Vol.3. doi: 10.1109/PESC.2004.1355417
- [67] Canutescu, A. A. and Dunbrack, R. L. (2003), Cyclic coordinate descent: A robotics algorithm for protein loop closure. Protein Science, 12: 963–972. doi:10.1110/ps.0242703
- [68] Wright, S.J., 2015. “Coordinate descent algorithms”. In “Mathematical Programming”. June 2015. vol. 151. issue 1. pp.3-34.
- [69] Van Laarhoven, P.J. and Aarts, E.H., 1987. Simulated annealing. In Simulated annealing: Theory and applications (pp. 7-15). Springer, Dordrecht.
- [70] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi. 1983. “Optimization by Simulated Annealing”. In “Science” New Series, Vol. 220, No. 4598. (May 13, 1983), pp. 671-680.
- [71] Glover, F. 1989. “Tabu search—part I”. In “ORSA Journal on computing”. 1(3), 190-206.
- [72] Khuri, S., Schütz, M., Heitkötter, J. 1995. “Evolutionary heuristics for the bin packing problem”. In “Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms”. pp. 285-288. Springer, Vienna.
- [73] GWL/Power. 2015. „Specification Document - GWL/Sunny Poly 250 Wp“ [online] (citované – August 2016)

Príloha



Obr. 36: Paralelné zapojenie experimentu zo sekcie 3.4



Obr. 37: Zapojenia jednotlivých konvertorov použitých pri experimentoch

Vlastné publikácie

[1] Hodoň Michal, Žák Samuel, Kopkáš Martin, Ševčík Peter, Húdik Martin. 2015. „Application of WSN for smart power metering to avoid cheating on electric power consumption at places with shared power sources“. In: FedCSIS proceedings of the 2015 Federated conference on Computer science and information systems September 13-16, 2015, Łódź, Poland S. 1215-1221 Polskie Towarzystwo Informatyczne; IEEE Warsaw; Los Alamitos 2015, ISBN 978-83-60810-65-1. Dostupné na : http://kniznica.utc.sk/epcfiles/4495FB5DE23B405885D6A61455E13835/P1_356.pdf

[2] Kochláň Michal, Žák Samuel, Miček Juraj, Milanová Jana. 2015. „Control unit for power subsystem of a wireless sensor node“. In: FedCSIS proceedings of the 2015 Federated conference on Computer science and information systems September 13-16, 2015, Łódź, Poland S. 1249-1256 Polskie Towarzystwo Informatyczne; IEEE Warsaw; Los Alamitos 2015, ISBN 978-83-60810-65-1. Dostupné na : http://kniznica.utc.sk/epcfiles/4C357CF98DAD40AE97292754460561F6/P3_355.pdf

[3] Kochláň Michal, Žák Samuel, Hodoň Michal, Miček Juraj, Karpiš Ondrej. 2016. „Multichannel recorder for low frequency signals [application of oscilloscope as integrated mobile service for a smartphone]“. In: Mobile information systems Vol. 2016. (elektronický zdroj), online, article ID 8472063, [7] s., ISSN 1574-017X Dostupné na : <http://downloads.hindawi.com/journals/misy/2016/8472063.pdf>

[4] Samuel Žák, Peter Šarašin, Peter Ševčík. 2016 „The multi-topology converter for the solar panel“. In: FedCSIS : proceedings of the 2016 Federated conference on Computer science and information systems : September 11-14, 2016, Gdańsk, Poland. ISBN 978-83-60910-92-7. - S. 1107-1110. Annals of computer science and information systems, Vol. 8. - ISSN 2300-5963. Dostupné na : https://annals-csis.org/Volume_8/pliks/576.pdf

[5] Kochláň Michal, Žák Samuel, Miček Juraj, Hodoň Michal, Húdik Martin. 2016. „Performance of open voltage control algorithm for sensor node power management unit“. In: Information and digital technologies 2016 [elektronický zdroj] : proceedings of the international conference : 5-7 July 2016 Rzeszów, Poland. ISBN 978-1-4673-8860-3. s. 138-143. Dostupné na : http://kniznica.utc.sk/epcfiles/1FE61C31BF6548BF979475AF2E678430/P3_IDT_2016_zak.pdf

[6] Samuel Žák, Jaroslav Szabo. 2017. „Load balancing of heterogeneous parallel DC-DC converter“. In: [FedCSIS] : proceedings of the 2017 Federated conference on Computer science and information systems : September 3-6, 2017. Prague, Czech Republic. ISBN 978-83-946253-9-9. - S. 895-899. Annals of computer science and information systems, Vol. 11. - ISSN 2300-5963. Dostupné na : https://annals-csis.org/Volume_11/drp/pdf/199.pdf

- [7] Peter Šarařín, Martin Hůdik, Martin Revák, Samuel Źák, Peter Ševčák. “Modelling and identification of linear discrete systems using least squares method”. In “FedCSIS : proceedings of the 2017 Federated conference on Computer science and information systems : September 3-6, 2017. Prague, Czech Republic”. 2017. ISBN 978-83-946253-9-9. S.891-894. Annals of computer science and information systems, Vol. 11. - ISSN 2300-5963. Dostupné na : https://annals-csis.org/Volume_11/drp/pdf/406.pdf
- [8] Peter Ševčák, Samuel Źák, Michal Hodoň. “Wireless sensor network for smart power metering”. In “Concurrency and computation: practice and experience”. ISSN 1532-0636. Vol. 29, iss. 23 Spec. iss (2017), [8] s.