



Střední škola informatiky, elektrotechniky a řemesel

Rožnov pod Radhoštěm

PERSPEKTIVY ELEKTRONIKY 2016

9. CELOSTÁTNÍ SEMINÁŘ UČITELŮ STŘEDNÍCH ŠKOL

Sborník přednášek



Rožnov pod Radhoštěm
11. října 2016

PERSPEKTIVY ELEKTRONIKY 2016

9. CELOSTÁTNÍ SEMINÁŘ UČITELŮ STŘEDNÍCH ŠKOL

SBORNÍK PŘEDNÁŠEK

Střední škola informatiky, elektrotechniky a řemesel

Rožnov pod Radhoštěm

11. října 2016

Redakční rada PEL 2016:

Mgr. Miroslav Trefil

Mgr. Petr Fuchs

Ing. Anna Zejdová

Ing. Evžen Žabčík

Ing. Jana Vaculínová

Ing. Petr Stavinoha

Jan Koleček

Grafický návrh obálky:

Ing. Petr Stavinoha

Sazba a tisk:

SŠIEŘ Rožnov pod Radhoštěm, Školní 1610, 756 61 Rožnov pod Radhoštěm

© Únor 2017

ISBN 978-80-270-0566-6

OBSAH

Přednášející a témata semináře PEL 2016	7
Metody řízení moderních soustav s akumulací elektrické energie	9
Elektromechanické systémy pro automatizované dopravní centrum.....	23
Metody posuzování původnosti polovodičových součástek	31
Umělá inteligence aneb co už není sci-fi	47
Trendy v instalaci fotovoltaických panelů	61
Moderní způsoby uchovávání elektrické energie.....	69
Čtvrtá průmyslová revoluce	85
Energy harvesting - generátory energie s využitím energie okolního prostředí	93
Přílohy.....	114

PŘEDNÁŠEJÍCÍ A TÉMATA SEMINÁŘE PEL 2016

11. října 2016

Ing. Martin Sobek, Ph.D. (VŠB - TU Ostrava)

Metody řízení moderních soustav s akumulací elektrické energie

Ing. Zdeněk Slanina, Ph.D. (VŠB - TU Ostrava)

Elektromechanické systémy pro automatizované dopravní centrum

Ing. Petr Neumann, Ph.D. (UTB Zlín)

Metody posuzování původnosti polovodičových součástek

doc. Ing. Zuzana Komínková – Oplatková, Ph.D. (UTB Zlín)

Umělá inteligence aneb co už není sci – fi

Ing. Jiří Vávra, Ph.D. (UO Brno)

Trendy v instalaci fotovoltaických panelů

doc. Ing. Vít Bršlica, CSc. (UO Brno)

Moderní způsoby uchování elektrické energie

Ing. Soběslav Valach (VUT Brno)

Zpracování obrazu v hradlovém poli

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc. (VUT Brno)

Čtvrtá průmyslová revoluce

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc. (ČVUT Praha)

Energy harvesting - generátory energie s využitím energie okolního prostředí

firma NXP (Rožnov p. R.)

Moderní mikrokontroléry

METODY ŘÍZENÍ MODERNÍCH SOUSTAV S AKUMULACÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE

Martin Sobek, Aleš Havel

VŠB – Technická univerzita Ostrava, FEI, Katedra elektroniky,
17. Listopadu 15, 708 33 Ostrava

martin.sobek@vsb.cz, ales.havel@vsb.cz

Abstrakt:

V nastávající době bude přetrvávat trend zvyšování podílu výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Tento článek nastiňuje řešení akumulace energie, především elektrické v Technologickém centru Ostrava – TCO Centra ENET. Představuje řešení ukládání elektrické energie v akumulátorech za použití výkonových měničů s přidavnou funkcí aktivních filtrů síťového napětí. V druhé části se zabývá měniči pro technologie skladování elektrické energie za použití vodíku. Článek chce především seznámit čtenáře s metodami řízení měničů na nejnižší úrovni. Zabývá se regulací proudu a výkonu jednotlivých měničů a jejich koncepcí, ale už ne jejich nadřazeným řízením, rozhodovacími a regulačními postupy celého technologického centra.

Úvod

Neustále se vyvíjí tlak na zvyšování podílu výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Jedná se především o využití slunečního záření, vodní a větrné energie a energie ze spalování biomasy a bioplynu. Tyto typy energie (především sluneční a větrná) jsou charakteristické svou nestálostí. Jejich výkon je v čase velmi nestálý a nestabilní. Proto, při připojení takových zdrojů do rozvodné sítě, může velmi často docházet ke kolísání energetické bilance. Vliv obnovitelných zdrojů není zanedbatelný, protože se na celkové domácí spotřebě v roce 2015 podle [1] podílely 13,27 %. Z této hodnoty právě fotovoltaické elektrárny představují více než čtvrtinu. Proto se tento jejich vliv na rozvodnou síť nedá zanedbat.

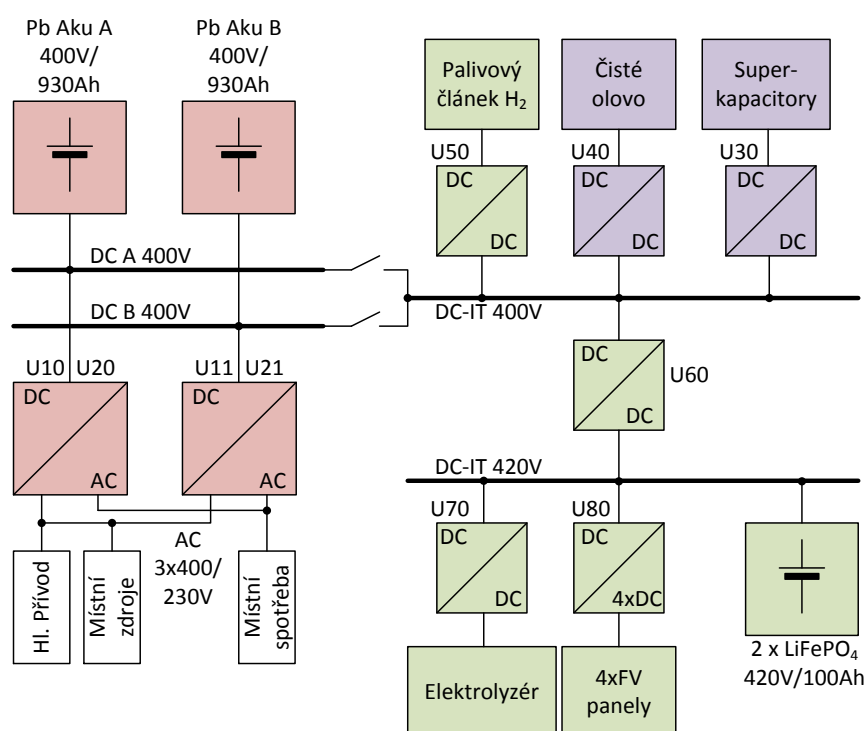
Jedním z možných řešení, jak se s těmito výkyvy v rozvodné síti vyrovnat, je využít systémy akumulace elektrické energie. V době přebytku výroby elektrické energie v rozvodné síti můžeme tuto energii akumulovat, a když je v síti energie nedostatek, můžeme tento nedostatek pokrýt energií, kterou jsme v době jejího přebytku uložili. Výhodou těchto systémů je, že jejich rozmístění není závislé na geografických, či jiných podmínkách a proto ho můžeme umístit tam, kde je budeme potřebovat nejvíce. Použití těchto systémů proto nemá své výhody v součinnosti s fotovoltaickými nebo větrnými zdroji elektrické energie, ale může najít své uplatnění i obecně ve všech místech distribučních sítí s nevyváženou bilancí výroby a spotřeby elektrické energie. Platí, že čím větší výkony zdroje jsou, tím více klesá dynamika, s jakou jsme schopni množství vyrobené energie regulovat. Malé akumulární jednotky mohou tuto situaci velmi účinně řešit.

Situaci, kdy máme velké přebytky elektrické energie, řeší částečně přečerpávací vodní elektrárny, které jsou schopny tuto energii akumulovat a později ji opět dodat. Problém ovšem nastává při rychlých, nepředvídatelných situacích. Protože tyto přečerpávací vodní elektrárny pracují s výkony v řádech až stovek megawattů, rychlost jejich náběhu je v řádu minut.

Z tohoto důvodu potřebujeme akumulační systém, který je schopný naběhnout v řádech sekund až milisekund.

Takový modelový systém byl vytvořen v rámci vědecky-výzkumného projektu Centra ENET v Technologickém centru Ostrava - TCO. Tento systém využívá pro svou funkci akumulaci elektrické energie v elektrochemických akumulátorech. Dodávku elektrické energie z akumulátorů do sítě a zpět zajišťuje struktura polovodičových měničů.

Dále byl tento systém doplněn o technologie pro skladování energie v zásobě plynného vodíku. Tato část je tvořena elektrolyzéry, palivovými články a zásobním prostorem pro stlačený vodík. Tato technologie je vybavena vyrovnávacím lithium železo fosfátovým akumulátorem s napojením na hlavní akumulační systém.



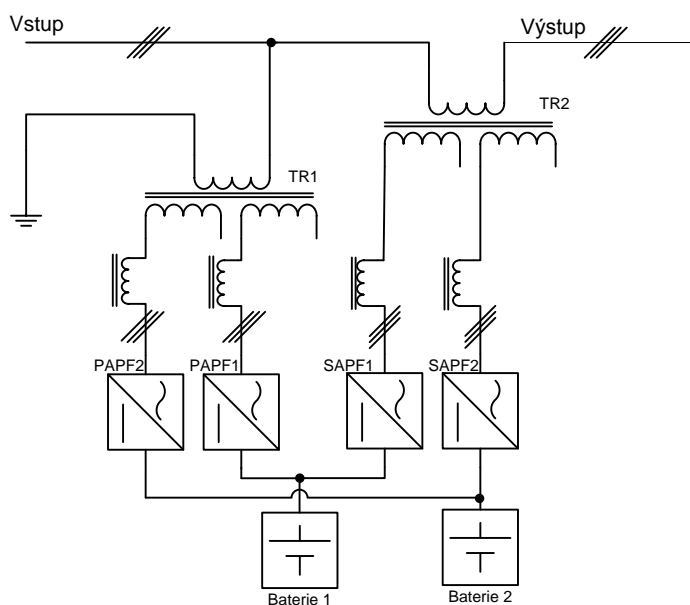
Obr. 1 Zjednodušené blokové schéma elektrických technologií TCO

Na obr.1 je zjednodušené schéma elektrických technologií TCO se zaměřením na struktury obsluhující akumulaci elektrické energie. Hlavní část akumulační technologie tvoří Měniče U10, U11, U20, U21 a k nim připojené olověné akumulátory. Vždy jeden z těchto dvou akumulátorů je připojen na vnitřní sběrnici centra DC-IT 400V. K této sběrnici jsou připojeny měniče vodíkových technologií U50 a U60 a doplňkových zdrojů U40 a U30. Pomocí měniče U60 jsou propojeny obě stejnosměrné sběrnice centra. K té druhé s názvem DC-IT 420V je pak připojen LiFePO₄ akumulátor, který umožňuje akumulovat nadbytek energie z fotovoltaických panelů, která nebyla ihned spotřebována. Tyto panely jsou připojeny ke sběrnici pomocí měniče U80. Výroba vodíku se provádí v elektrolyzérech, které jsou připojeny k měniči U70.

Měniče pro akumulaci elektrické energie

Na obr.2 je blokové schéma zapojení měničů akumulace elektrické energie TCO. Na levé části obrázku je vstup ze střídavé veřejné rozvodné sítě 3x400V/230V. Na tento vstup jsou prostřednictvím transformátoru TR1 připojeny měniče paralelní větve akumulace. Výstupní proud do zabezpečené sítě centra je pak veden přes transformátor TR2 který je napájen z měničů sériové větve.

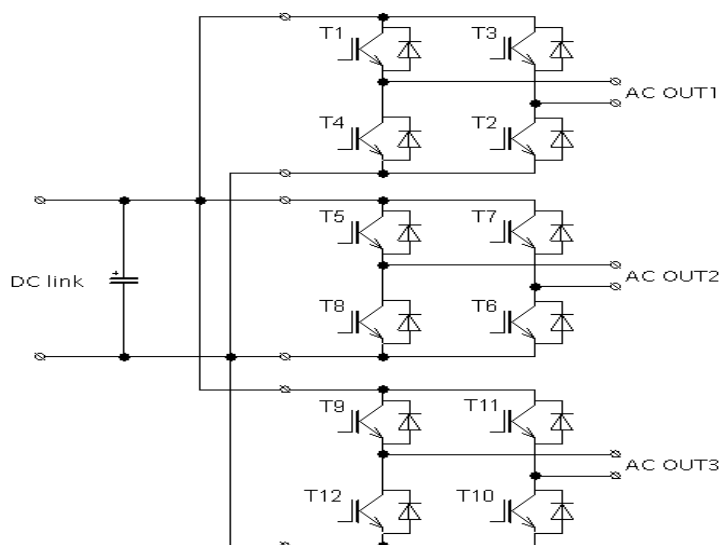
Jsou použity dvě shodné akumulátorové baterie. Každá je tvořena olověnými trakčními akumulátory o kapacitě 930Ah. Počet článků jedné baterie je 200 kusů, jmenovité napětí této baterie je pak 400V. Odhadovaná využitelná energie v jedné baterii je 300kWh. Jedna baterie je vždy připojena k jednomu měniči z paralelní větve a jednomu z větve sériové. Také podle výběru obsluhy k místní stejnosměrné sběrnici centra, z které jsou napájené i další technologie.



Obr. 2 Blokové schéma zapojení měničů pro akumulaci elektrické energie

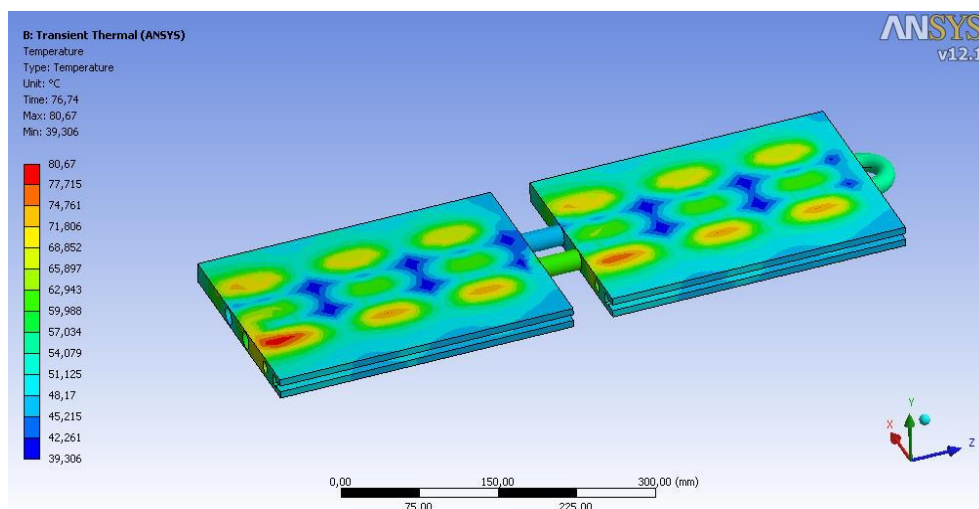
Paralelní větev akumulace je tvořena dvěma měniči (PAPF1 a PAPF2), bateriemi, pracovními tlumivkami a transformátory TR1. Paralelní větev pracuje na principu pulzního usměrňovače. Tento měnič pracuje jako střídač zvyšující napětí a proto potřebuje, aby napětí na stejnosměrné straně bylo vyšší než amplituda síťového napětí. Z tohoto důvodu je vstupní síťové napětí sníženo transformátory TR1. Jedná se o tři jednofázové transformátory 230V/2x115V, každý se jmenovitým výkonem 40kVA. Sériová větev se skládá z dvou měničů (SAPF1 a SAPF2), bateriemi a transformátory TR2 s pracovními tlumivkami. Sériová větev pracuje jako sériový aktivní filtr, který potřebuje z principu své činnosti transformátor. Jsou použity tři jednofázové transformátory převodovým poměrem 80V/2x115V a výkonem 20kVA. Hlavní činností paralelní větve je akumulace energie a druhotnou je filtrace síťového napětí. Naproti tomu je hlavní funkcí sériové větve filtrace napětí pro místní spotřebu centra. Filtrují se především deformace střídavého napětí vyššími harmonickými síťového a dále podpětí či přepětí.

Z důvodů variability a víceúčelovosti bylo použito koncepce třífázového střídače složeného ze třech H můstků. Tato koncepce je vyobrazena na obrázku níže.



Obr. 3 Základní zapojení střídače pro systém akumulace

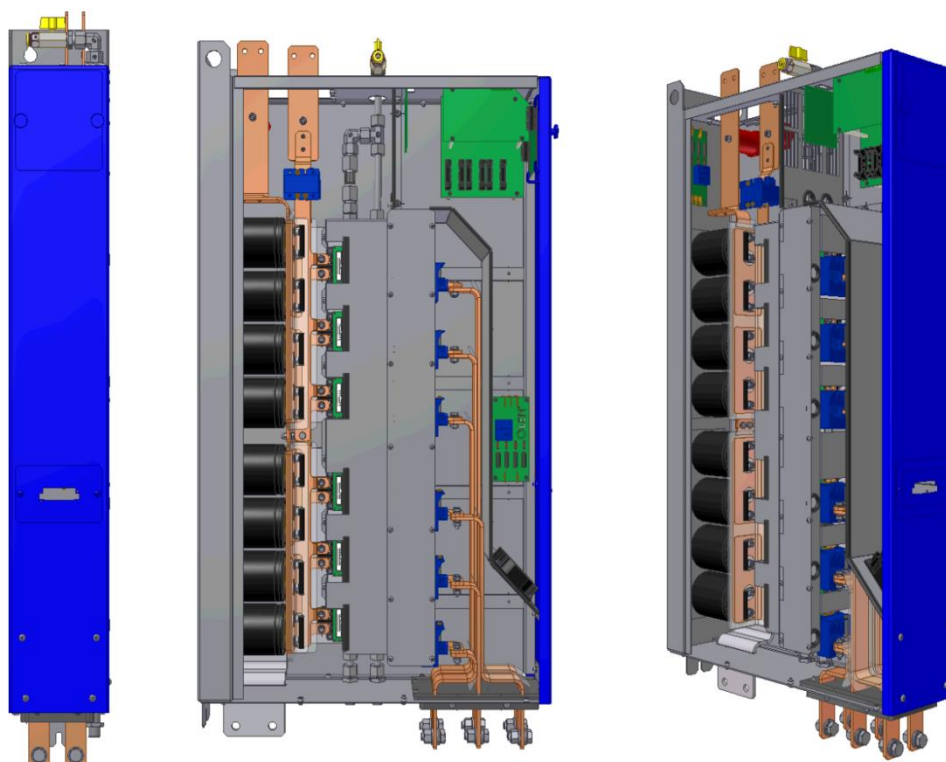
Tato koncepce nám umožňuje velkou variabilitu celého měniče. Ten můžeme použít jako třífázový střídač, třífázový pulzní usměrňovač, 3 jednofázové střídače, 3 jednofázové pulzní usměrňovače, nebo jako kombinaci jednofázových střídačů a usměrňovačů, po případě jako 2 třífázové střídače. Při použití jako jednoho třífázového střídače máme navíc možnost vytvářet jak bipolárně, tak i unipolárně modulované výstupní napětí. Měnič byl navrhován na maximální výstupní proud 200A při vstupním stejnosměrném napětí do 800V. Navrhovaný jmenovitý výstupní výkon činí 75kW. Jako výkonové spínací prvky byly vybrány bezpotenciálové moduly POWEREX CM200DX-24S. Každý modul obsahuje 2 IGBT tranzistory pro proud do 200A. O buzení těchto modulů se stará budič Concept 2SP0115T2A0. Ztrátový výkon při maximálním zatížení byl spočten na 750W na tranzistorový modul. S ohledem na velikost výkonu je v tomto měniči navrženo kapalinové chlazení. Toto kapalinové chlazení bylo navrženo na základě teplotní simulace. Použitý chladič je složen ze dvou částí chladiče WP16 firmy Semikron. V simulacích bylo počítáno s maximálním průtokem 10l/min a maximální teplota modulu dosažená v simulacích byla 80°C při maximálních ztrátách. Výsledek takovéto simulace je zobrazen na obrázku 4.



Obr. 4 Výsledek teplotní simulace pro použitý typ kapalinového chladiče; teplota vstupního chladičového média 40°C; maximální teplota 80°C

Napětový meziobvod měniče je tvořen kondenzátorovou baterií složenou z osmi elektrolytických kondenzátorů Kendeil s kapacitou 2200uF/400V. Vždy dva kondenzátory jsou spojeny do série pro dosažení vyššího pracovního napětí, jelikož napětí připojené baterie může dosáhnout až 500V, a dále jsou spojeny paralelně. Celková kapacita meziobvodu je 4,4mF pro maximální napětí 800V, tudíž máme dostatečnou napětovou rezervu.

Celkové uspořádání měniče je vyobrazeno na následujícím 3D modelu. Z horní strany jsou provedeny stejnosměrné vstupy a odvzdušňovací ventil chladících kanálů a ze spodní strany jsou připojeny střídavé výstupy a vývody chladicí kapaliny. V pravém horním rohu jsou umístěny řídicí obvody měniče spolu s řídicím procesorovým systémem a napájecím zdrojem. Model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor.

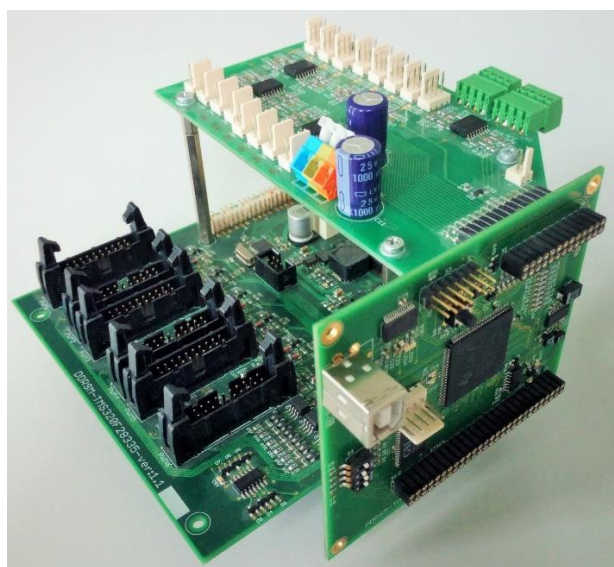


Obr. 5 3D model třífázového měniče systému akumulace elektrické energie

Pro potřeby řízení měničů, bylo potřeba vybrat vhodný řídicí systém, který by byl schopen obsluhovat výkonové části měniče a zároveň byl i dostatečně rychlý pro provádění regulačních algoritmů pro jejich řízení. Proto byl vytvořen řídicí systém s digitálním signálovým procesorem určeným pro aplikace s elektrickými pohony. Řídicí systém je vytvořen na základě 32bitového digitálního signálového procesoru Texas Instruments TMS320F28335. Tento procesor je schopen pracovat na hodinovém kmitočtu 150MHz, což znamená, že je díky své architektuře DSP schopen provést až 150MIPS. Teoretický čas pro provedení jedné instrukce je tedy 6,67ns. Aritmeticky-logická jednotka tohoto procesoru je schopna přímo pracovat s vyjádřením čísel s plovoucí řádovou čárkou (formát Float v 32bitovém vyjádření). Řídicí systém se skládá z několika desek. Sestava řídicího systému je na obrázku 6.

Řídicí systém má následující vlastnosti:

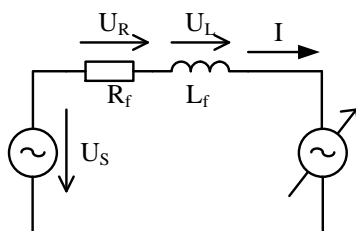
- 16 analogových vstupů, rozlišení 12 bitů.
- 4 analogové výstupy, rozlišení 12 bitů.
- 6 výstupů pro připojení výkonových budičů včetně jejich napájení, celkem tedy 12PWM výstupů.
- synchronizace PWM mezi jednotlivými měniči.
- Měření teplot výkonových modulů a průtoku chladiva chladičem.
- Komunikační rozhraní: PC - USB, RS422/485 – nadřazený systém
- Možnost o doplnění komunikačního modulu sběrnice Profibus



Obr. 6 Řídicí systém s TMS320F28335 pro měniče

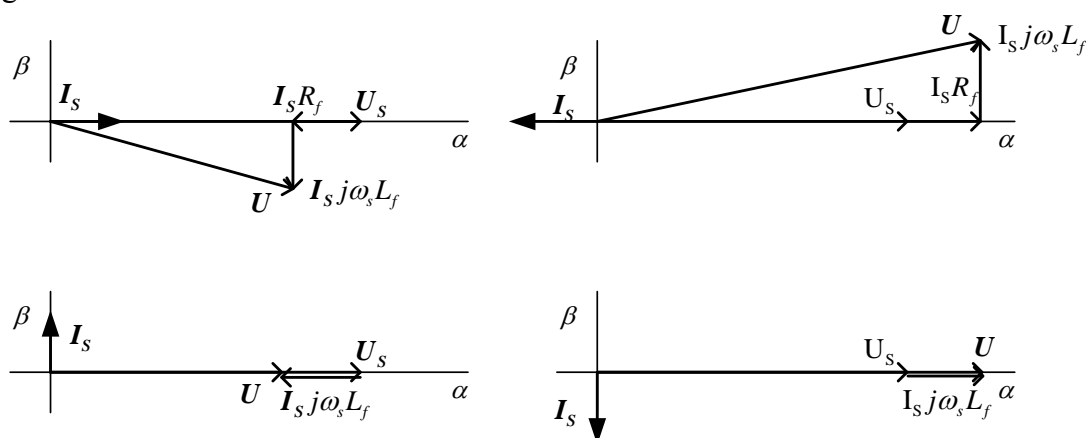
Měniče paralelní větve

Měniče paralelní sekce pracují jako pulzní usměrňovače. Umožňují obousměrný tok činné i jalové energie na střídavé straně. Pracují na principu propojení dvou střídavých zdrojů přes pracovní tlumivku obrázek 7. Přičemž jeden zdroj představuje napájecí střídavá síť. Druhý střídavý nastavitelný je vlastní střídač (jednofázový či třífázový).



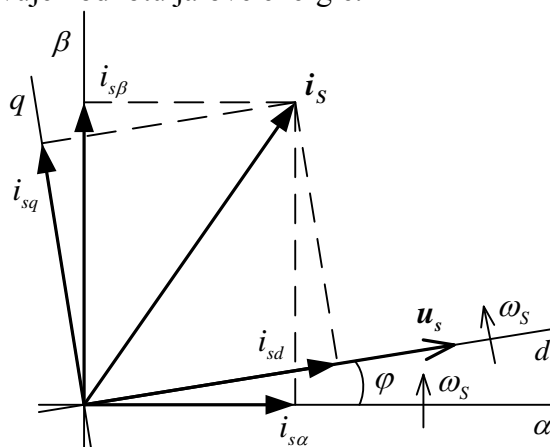
Obr. 7 Náhradní schéma jedné fáze pulzního usměrňovače

Prostřednictvím změny napětí a fáze střídavého napětí výstupního střídače UM můžeme měnit proud tekoucí pracovní tlumivkou L_f , respektive výkon odebíraný či dodávaný do sítě. Na obrázku 8 jsou specifikovány čtyři základní provozní režimy pulzního usměrňovače, jsou to dodávka činné energie do sítě, činný odběr energie ze sítě, a také dodávka či odběr jalové energie do sítě.



Obr. 8 Komplexní diagramy napětí a proudu v jedné fázi řízeného usměrňovače

Pro regulaci střídavého proudu, který teče pracovní tlumivkou, využíváme princip rozložení vektoru proudu do dvou na sebe kolmých složek podle vektoru napájecího napětí. Obrázek 9. Kdy složka proudu ve směru vektoru napětí představuje činnou energii a složka kolmá k tomuto vektoru představuje hodnotu jalové energie.

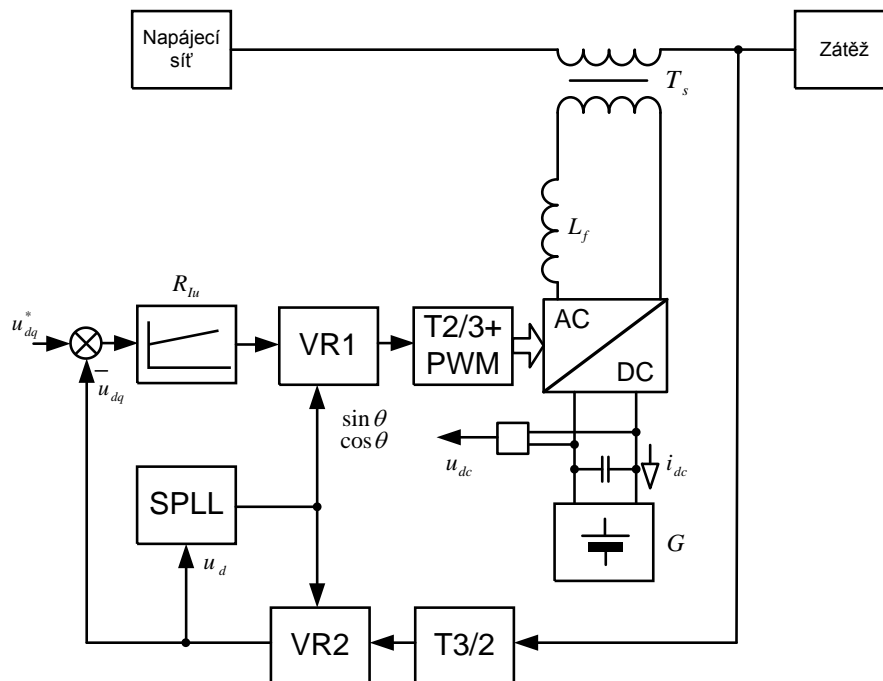


Obr. 9 Rozklad prostorového vektoru proudu podle prostorového vektoru napětí

Takovéto řízení často označujeme pojmem vektorová regulace proudu. Pokud získáme hodnotu úhlu natočení síťového napětí, můžeme pak pomocí tohoto úhlu takzvaně zastavit rotující vektor proudu a pak můžeme tento proud regulovat prostřednictvím jednoduchých PI regulátorů. Zpětnou rotací pak můžeme získat žádané napětí pro střídač. Blokové schéma regulace je pak na obrázku 10. Blok T3/2 provádí transformaci třífázové soustavy do dvoufázové (Clarkova transformace), bloky VR1 a VR2 provádí vektorovou rotaci (Parkova transformace), blok zrušení křížové vazby BZV, Blok SDFT realizuje výpočet polohy vektoru síťového napětí.

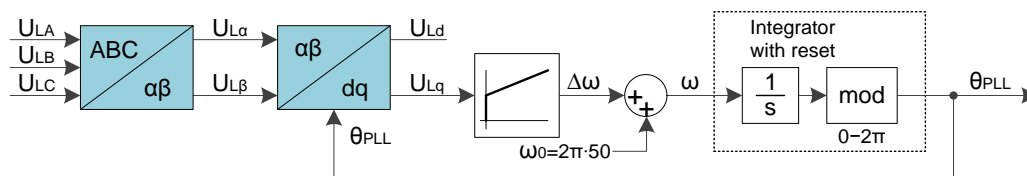
Měniče pro sériovou větev

Základem pro řízení měniče sériové větve je opět rozklad změřených veličin na rotující vektor v systému statických souřadnic pomocí transformace 3/2. Tento vektor se opět transformuje pomocí bloku vektorové rotace na statický vektor v systému rotujícím s úhlovou frekvencí sítě.



Obr. 12 Regulační struktura měniče pro sériovou větev

Jak je vidět z blokového schématu regulační struktury měniče pro sériovou větev (Obrázek 12), orientující úhel θ je zde získán jinou metodou, než u měniče pro paralelní větev. Je zde použit softwarový fázový závěs PLL. Tento softwarový fázový závěs sleduje frekvenci napětí na zátěži a porovnává ji s referenční frekvencí. Blokové schéma tohoto fázového závěsu je uvedeno na následujícím obrázku. Žádané hodnoty pro regulaci měniče sériové větve vycházejí ze jmenovitých parametrů sítě. To znamená, že chceme, aby byl odebrán (resp. dodáván) pouze činný výkon a napětí se rovnalo jmenovitému napětí sítě. Podrobnější informace o sériovém aktivním filtru lze nalézt v [3].



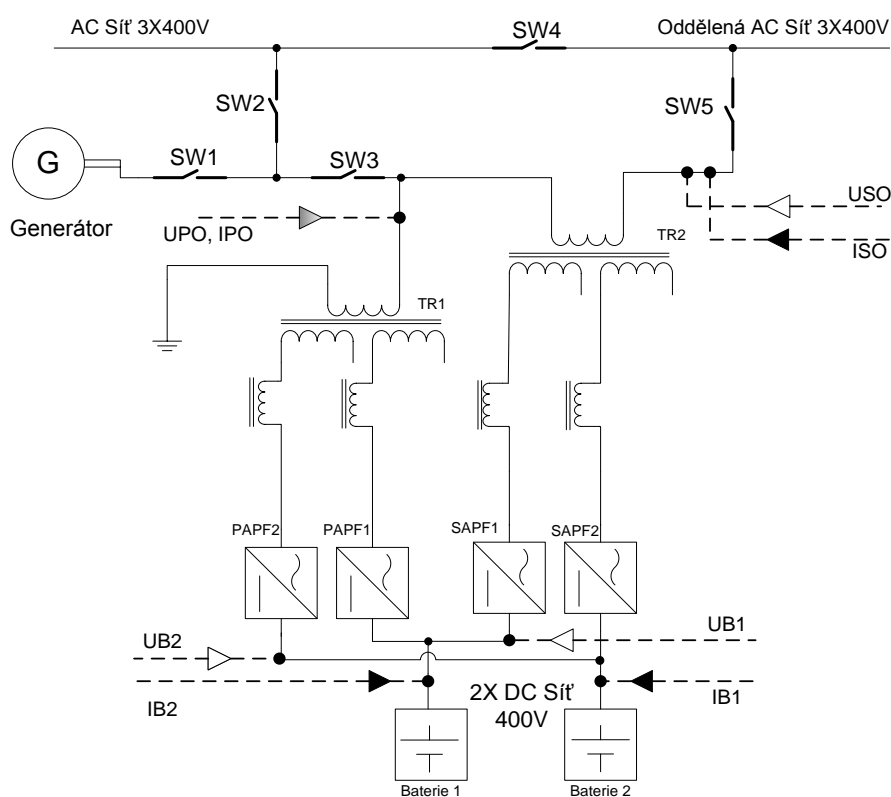
Obr. 13 Blokové schéma softwarového fázového závěsu

Možnosti konfigurace soustavy měničů

Tato popisovaná soustava pro akumulaci elektrické energie umožňuje využití hned několika provozních režimů v závislosti na okolních podmínkách a požadavcích obsluhy. A to:

- Dodávka elektrické energie z obou baterií do sítě – střídačový chod.
- Akumulace elektrické energie ze sítě do akumulátorů – usměrňovačový chod.
- Výměna energie mezi jednou a druhou baterií – cyklování akumulátorů.
- Režim filtrace.

O nastavení systému akumulace do některého z výše popsanych režimů se stará přepínací ústrojí, které je schopné konfigurovat celý systém. Na následujícím obrázku (Obrázek 14) je znázorněno blokové schéma systému, včetně všech stykačů, které zajišťují konfigurovatelnost systému. Dále jsou zde vyznačeny všechny měřící body, které jsou důležité pro řízení systému.



Obr. 14 Blokové schéma soustavy s měřícími body nadřazeného řízení

Význam symbolů z obrázku 6.3 je následující:

UB, IB – Napětí; proud baterie

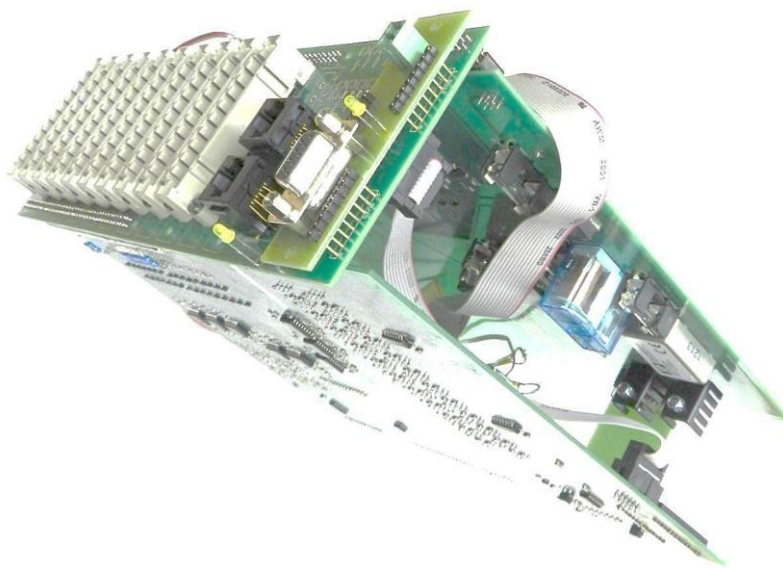
UPO, IPO – Výstupní napětí; výstupní proud paralelního měniče

USO, ISO – Výstupní napětí; výstupní proud sériového měniče

Řízení a monitorování stavu akumulačního systému

Pro potřeby nadřazeného řízení systému akumulace elektrické energie bylo navrženo zařízení nazvané Měřicí a řídicí ústředna systému akumulace, které je založeno digitálním signálovým procesorem Texas Instruments. Tato ústředna má za úkol kontinuálně měřit všechna dostupná napětí a proudy v systému akumulace elektrické energie a na jejich základě vyhodnocovat stav celého systému a provádět jeho řízení dle požadavků obsluhy. Proto je měřicí ústředna vybavena také komunikačními rozhraními pro komunikaci s připojenými měniči, a dále i komunikačními rozhraními pro komunikaci s obsluhou. Provedení měřicí ústředny bez vnějšího kovového krytu je na obrázku 15. Základní parametry měřicí ústředny jsou:

- Základem je DSC TMS320F28335;
- 32 analogových vstupů;
- 4 analogové výstupy;
- 12 digitálních vstupů;
- 12 digitálních výstupů;
- Komunikace RS422/485;
- Komunikace Profibus;
- Napájení 24V.



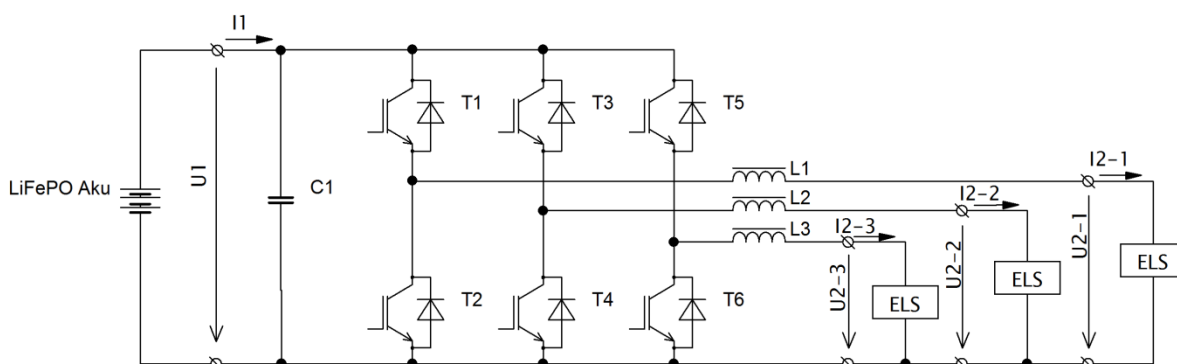
Obr. 15 Měřicí ústředna bez vnějšího krytu

Měřicí ústředna má několik úkolů. Především měří v určených bodech technologie akumulace, napětí jak stejnosměrné tak i střídavé, proud stejnosměrný i střídavý, frekvenci střídavého napětí, činný výkon, jalový výkon a deformační výkon. Zajišťuje komunikaci s nadřazeným centrálním řídicím systémem po rozhraní Profibus. Měřené parametry jsou pak centrálním počítačem ukládány do databáze. Zadává požadované hodnoty jednotlivým měničům pomocí komunikace po sběrnici RS422. Zpracovává provozní parametry jednotlivých měničů a předává je nadřazenému centrálnímu počítači k archivaci.

Měniče pro vodíkové technologie

Systém na akumulaci elektrické energie ve stlačeném vodíku se skládá z několika částí. Konstrukčně se jedná o podobné měniče jako pro akumulaci, které byly popsány výše. Byly u nich provedeny pouze dílčí úpravy, například osazeno méně výkonových prvků, nebo rozdělen meziobvod na dvě stejné poloviny. Řídicí systém zůstal shodný, byl jen osazen pro použití komunikace na sběrnici RS485.

Vlastní výroba vodíku se děje prostřednictvím elektrolyzérů. Tyto elektrolyzéry jsou zapojeny jednotlivými články do série jako akumulátorová baterie. Napájení elektrolyzérů se děje prostřednictvím DC/DC měniče na obrázku 16. Základní vlastnosti měniče jsou: jmenovité napájecí napětí 420V, maximální napětí na vstupu 800V, maximální proud výstupu 100A, jmenovité napětí na výstupu 250V, požadovaný maximální výkon 30kW, spínací frekvence 10kHz.

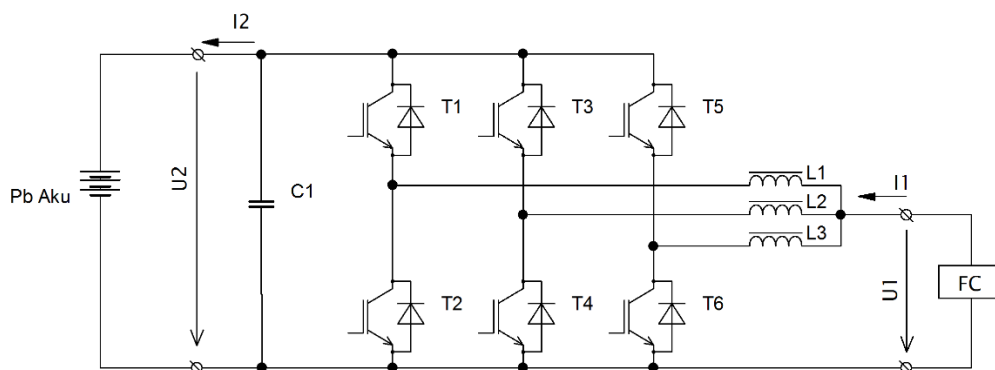


Obr. 16 Funkční schéma zapojení měniče pro elektrolyzéry

Měnič je tvořen třemi samostatnými DC/DC měniči, v každé větvi je připojena sekce elektrolyzérů. Proud v jednotlivých větvích je možné nastavovat odděleně. Elektrolyzér se chová při malých hodnotách výstupního střídy měniče jako akumulátor a vyhlazuje napětí přibližně na hodnotu plynovacího napětí elektrolyzérů, elektrolyzér skoro vůbec neplynuje. Pokud zvýšíme střídu měniče na hodnotu odpovídající plynovacímu napětí elektrolyzérů, začne se chovat elektrolyzér jako akumulátor s malým vnitřním odporem, při zvýšení střídy napětí neroste, roste jen proud. Z tohoto důvodu je pak měnič řízen jen pomocí jednoduché proudové regulační smyčky s PI regulátorem.

Měnič elektrolyzérů je napájen ze stejnosměrné sběrnice DC-IT 420V. K této sběrnici je rovněž připojen akumulátor. Akumulátor je Lithium železo fosfátový se jmenovitou kapacitou 100Ah. Tyto akumulátory jsou dva, je možné připojit ke sběrnici vždy pouze jeden. Akumulátory jsou vybaveny příslušnými balancéry, které umožňují kontrolu jejich stavu, tak aby nedošlo k jejich přebití. Pro napájení této sběrnice jsou primárním zdrojem solární panely umístěné na střeše centra. Panely jsou připojeny přes zvyšující měnič. Panely můžou po přepnutí na běžné střídače dodávat energii přímo do rozvodné sítě.

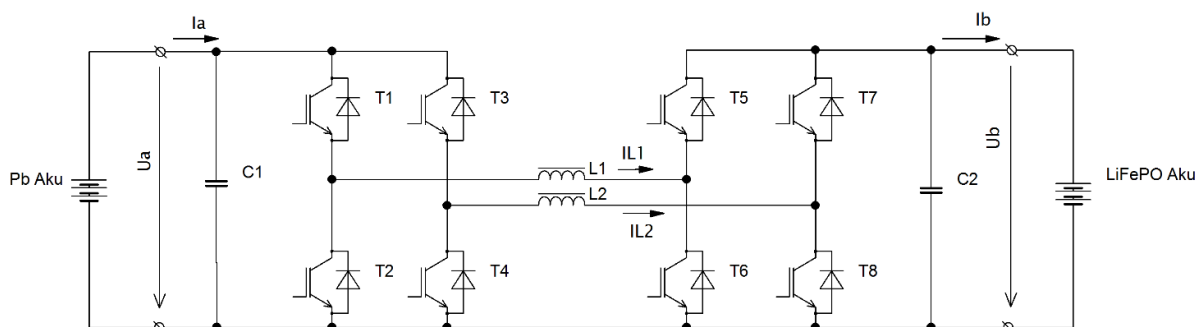
Palivové články, které přeměňují uskladněný vodík zpět na elektrickou energii, jsou připojeny prostřednictvím měniče (měničů) k primární stejnosměrné sběrnici DC-IT400V, která je připojena vždy k jednomu ze dvou olovených akumulátorů akumulacího systému. Zapojení výkonové části měniče je na obrázku 17.



Obr. 17 Funkční schéma měniče pro palivové články

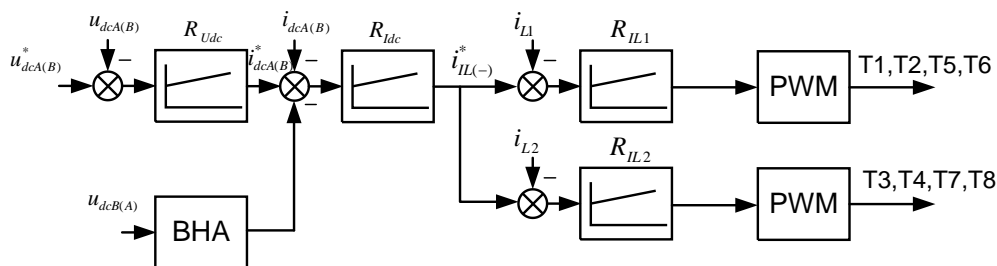
Jedná se o třífázový snižující stejnosměrný měnič. Třífázová koncepce měniče byla zvolena pro zmenšení zvlnění výstupního proudu, toto zvlnění oproti jedné fázi je třetinové, rovněž je frekvence tohoto zvlnění proudu trojnásobná. Měnič pracuje jako zvyšující s regulací proudu pomocí PI regulátoru. Nadřazený systém podle napětí na palivovém článku rozhoduje o velikosti zatěžovacího proudu. Vlastnosti měniče jsou: vstupní napětí 130 – 350V, maximální napětí na vstupu 370V, maximální proud na vstupu 250A, jmenovité napětí na výstupu 400V, požadovaný maximální výkon: 50kW, spínací frekvence 10kHz.

Aby bylo možné přenášet energii mezi oběma sběrnicemi jinak než prostřednictvím vodičku, je centrum doplněno o takzvaný vazební měnič na obrázku 1 označený U60. Schéma zapojení výkonové části je na obrázku 18.



Obr. 18 Funkční schéma zapojení vazebního měniče

Měnič je řešen jako dvoufázový zvyšující/snižující měnič. Dvoufázové řešení bylo zvoleno pro zmenšení zvlnění vstupně/výstupního proudu. U tohoto měniče nelze rozlišit vstupní a výstupní strana, proto jsou tyto vstupy – výstupy označeny písmeny A a B. Na straně A je připojena sběrnice s olověným akumulátorem a na straně B je pak připojena sběrnice s akumulátorem LiFePO4. Jelikož napětí obou sběrnic jsou si velmi podobná svou velikostí, představuje řešení s přepínáním funkce měniče mezi snižující a zvyšující topologií podle velikosti napětí poměrně komplikovanou úlohu. Proto bylo přistoupeno ke zjednodušení regulační struktury pouze na zvyšující topologii.



Obr. 19 Blokové schéma regulační struktury vazebního měniče

Blokové schéma regulace výkonu je na obrázku 19. Princip regulace přenášeného výkonu je velmi zjednodušen. Kdy podle požadavku nadřazeného řízení je vybrána jedna strana pro regulaci napětí, z tohoto regulátoru napětí vychází žádaný proud tekoucí do dané sběrnice. Hodnota omezení proudu se dá nastavit z nadřazeného systému tak aby nedošlo k přetížení měniče nebo k poškození akumulátorů nadměrným proudem. Tento proud je pak zadáván do regulátoru proudu pracovními tlumivkami. Tento proud je následně regulován, prostřednictvím změny střídavé spínání výkonových tranzistorů. Pro směr proudu ve směru A – B se spínají tranzistory T1, T3, T6, T8 pro směr proudu B – A jsou vybírány tranzistory T2, T4, T5, T7. Aby nemohlo dojít k nadměrnému vybití, nebo přebití druhého akumulátoru, který není v regulaci je struktura doplněna o kontrolní blok. Ten případně omezí proud tak, aby bylo zabráněno tomuto stavu. Parametry měniče jsou: jmenovité napětí na straně A 400V, strana B 420V, maximální proud tlumivkami 200A, požadovaný maximální výkon 50kW, tento odpovídá cca 100A na vstupu/výstupu, spínací frekvence 10kHz.

Výše uvedené měniče pro vodíkové technologie komunikují s nadřazeným systémem prostřednictvím sběrnice RS485 komunikačním protokolem Modbus RTU. Uživatel pomocí ovládacích obrazovek na velínu může zadávat požadované hodnoty napětí a proudu, případně výkonu. Samozřejmostí je zobrazení všech důležitých provozních parametrů měničů. Veškeré provozní data jsou pak archivovány pro budoucí vyhodnocení.

Závěr

Na tomto zajímavém úkolu realizace měničů pro technologické centrum, pracoval celý tým studentů a doktorandů. Bylo potřeba definovat požadavky na měniče tak aby vyhověly zadání projektu, navrhnout vhodné řídicí algoritmy a k těmto algoritmům vyhovující hardware. Bylo realizováno několik diplomových a doktorských prací. Tento článek je spíše přehledem použitých měničů pro danou technologii, než vyčerpávajícím návodem pro řešení technologie akumulace elektrické energie. V nynější době 2016 probíhá dlouhodobé zkoušky algoritmů řízení měničů v testovacím provozu centra. Z těchto zkušebních dat pak bude zvoleno optimální automatizované řízení centra. Závěrem bychom rádi uvedli, že představená koncepce měničů byla následně rozšířena a optimalizovaná do jednoduché konstrukční řady měničů se součtovými výkony od 25kW do 150kW, pro použití v mobilních aplikacích, např. lokomotivy, nabíječe apod.

Literatura a zdroje:

- [1] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ES ČR 2015. [online]. [cit. 2016-10-20]. Dostupné z: http://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2015.pdf
- [2] JACOBSEN, Eric and Richard LYONS. The sliding DFT. *Signal Processing Magazine, IEEE*. 2003, č. March
- [3] Odlevák, L.: MODERN METHODS OF POWER TRANSMISSION IN SYSTEMS WITH ELECTRICAL ENERGY ACCUMULATION, Teze disertační práce, VŠB-TU Ostrava, 2012

ELEKTROMECHANICKÉ SYSTÉMY PRO AUTOMATIZOVANÉ DOPRAVNÍ CENTRUM

Zdeněk Slanina

VŠB-Technická univerzita Ostrava, FEI, Katedra kybernetiky a biomedicínského
inženýrství, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba

zdenek.slanina@vsb.cz

Abstrakt:

Mezi nejvíce skloňované termíny dnešních velkých aglomerací je koncept chytrého města (Smart City), převážně spočívající v rozvoji infrastruktury dopravy, služeb a budov a jejich propojení do sítě a následné inteligentní řízení. Na jedné straně této sítě jsou pak informační technologie, ke kterým je upírán pohled většiny uživatelů, na straně druhé senzory, a následně řídicí systémy na bázi vestavěných systémů, bez kterých se tyto systémy neobejdou. Zmínka o vysoce zalidněných městech padla z důvodu velkého přebytku osobních vozidel, která nelze umístit na klasická parkoviště a je třeba hledat cesty, jak je odsunout z chodníků, nabídnout například jejich větší zabezpečení proti odcizení a udržet možnost rychlého vyparkování. Z tohoto důvodu byl na půdě Vysoké školy báňské, TU Ostrava realizován parkovací dům, respektive automatizované dopravní centrum, který slouží především k ověřování tohoto systému na různých úrovních řízení. Jednotlivé aspekty jsou nastíněny v následujícím textu.

1. Automatizované dopravní centrum (ADC)

Výše zmíněné centrum, dále jen ADC, případně parkovací dům, bylo realizováno v roce 2012 v rámci výstavby nové Fakulty elektrotechniky a informatiky. Jedná se o unikátní reálný mechatronický systém představující plně automatizované zakladačové zařízení, které je schopné ukládat ve čtyřech nadzemních podlažích palety s automobily (obrázek 1). Budova ADC, která stojí na ploše o ploše 400 m² je určena pro parkování 37 osobních automobilů a jedna z částí slouží jako laboratoř pro vývojové či vědeckovýzkumné účely, případně výuku vztahovanou k této technologii. Nedílnou součástí vybavení je rovněž diesela agregát, který v případě výpadku elektřiny je schopen zajistit práci celého objektu.

Celý parkovací dům je neustále rozvíjen, především za pomoci inovačních voucherů tak, aby se co nejvíce přiblížil realizaci budovy zapadající do konceptu smart city. Cílem tohoto článku je popsat některé základní části a jejich vzájemné propojení.

2. Elektromechanická koncepce parkovacího domu

Celý způsob práce s parkovacím domem začíná načtením RFID karty na stojanu při vjezdu při potřebě parkování automobilu. V případě volného parkovacího místa a pozitivního ověření karty přítomnosti karty v řídicím systému jsou otevřena vnější vrata a umožněn vjezd na kruhovou otoč v příjmové místnosti. Auto je zváženo, jsou zajištěny rozměry, které nesmí přesáhnout povolené limity, jinak je řidič s automobilem vyzván k opuštění odbavovacího prostoru. V případě potvrzení RFID kartou jsou vnější vrata zavřena a dochází k samotnému parkování palety s autem. V technologické části je to jediný přístupný prostor autorizovaným osobám k parkování, čímž je zajištěna bezpečnost osob, samotných automobilů i majetku v nich.

Poté řídicí systém vyjme paletu s automobilem pomocí horizontálního sběrače palety, tzv. skipu, z kruhové otoče, přes vnitřní vrata a předá ji na výtah. Ten ji dopraví ve vertikálním směru na příslušné patro, kde jiný skip dokončí dopravení a zasunutí palety na své místo (obrázek 2).



Obr. 1. Parkovací dům VŠB-TU Ostrava.

Mezitím je možné za využití stejných mechanismů dopravit do kruhové otoče příjmové místnosti prázdnou paletu a systém je tak připraven na příjem dalšího automobilu. Celý čas zaparkování je dán využitými místy v parkovacím domě a v původní verzi se pohybuje v řádu několika minut. Tento parametr je velmi ostře sledován a v budoucnu dojde k jeho optimalizaci, nicméně je třeba si uvědomit, že čas vyparkování z center obchodních domů je velmi blízký, v některých případech mnohem delší.

Dle textu výše lze usuzovat na využití velkého množství senzorů a aktuátorů, nicméně realita je mnohem prostší. Odbavovací prostor, příjmová místnost, je vybavena optickými závory pro měření vjezdu automobilu, případně pohybu osob přes vnější vrata. Dále jsou využity světelné mříže, které měří rozměry automobilu, případně orientaci automobilu na paletě, aby v případě manipulace na skipech či výtahu nedošlo k jeho poškození. Kruhová otoč obsahuje již zmíněnou váhu, na jejímž základě je rozhodováno o možnosti zaparkování. Příjmová rovněž obsahuje dvě průmyslové kamery, které umožňují monitorovat pohyb v místnosti a při potvrzení zaparkování uchovávají fotografie parkovaného auta, případně mohou snímat SPZ a tyto údaje ukládat do souborového systému. Důvod užití kamerového systému je prostý, zamezí se tím případným žalobám na poškození automobilu. Bohužel v dnešní době je třeba myslet i na tyto aspekty služeb. Aktuátory jsou zde především ve formě motorů a jejich měničů, díky proudovým či napěťovým snímačům je možné monitorovat správnou činnost těchto zařízení. Nedílnou součástí kruhové otoče jsou i hydraulické brzdy, které znemožňují pohyb palety při parkování či vyparkování, a tím i její poškození. Nejvíce viditelné vybavení

je pak informační panel, který instruuje řidiče o správném umístění vozidla na paletě, jeho zabrzdění a případném opuštění odbavovacího prostoru.



Obr. 2. Vnitřní uspořádání parkovacího domu.

Vnitřní systém parkovacího domu tvoří zmíněné skipy, které jsou osazeny motory umožňujícími pohyb v horizontálním směru po celé délce budovy a vyjmutí či zasunutí palety. Opět jsou monitorovány elektrické vlastnosti pohonů, aby nedošlo k jejich poškození. Výtah má v realizované podobě pouze absolutní inkrementální čidlo, které je zdrojem některých problémů při automatickém provozu, proto dojde na konci roku 2016 k jeho úpravě a zajištění vyšší spolehlivosti provozu.



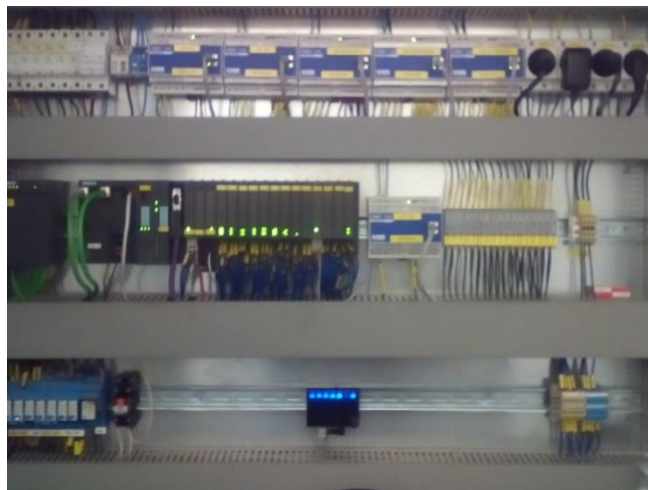
Obr. 3. Pohled z kamerového systému na paletu s automobilem vyjíždějící z kruhové otoče.

Jednotlivé palety jsou spojeny s místy, ve kterých jsou zasunuty. K tomu jsou opět využity optické závory a pro přesné usazení palety indukční snímače.

Až na pohyblivé skipy jsou všechny signály od snímačů, případně k aktuátorům připojeny do centrální řídicí jednotky metalickým vedením či bezdrátově. Do přehledu rovněž patří požární čidla, která v minulosti způsobila falešný poplach z důvodu poletujícího prachu skrz panely opláštění budovy nebo procházejících skupinek kuřáků. Díky rostoucí infrastruktuře kamerových systémů je naštěstí možné falešný poplach včas odvolat.

3. Řízení parkovacího domu

Z pohledu řízení je ADC distribuovaný systém. Je to dáno právě použitím pohyblivých komponent ve formě skipů. Centrální řízení je realizováno PLC Simatic ET200S. Jedná se o systém vzdálených vstupně-výstupních jednotek s moduly digitálních i analogových vstupů a výstupů. Ty jsou propojeny s výše zmíněnými částmi technologie pomocí průmyslového ethernetu, Profibusu, případně průmyslové wifi. Pro zajímavost, osazené moduly digitálních výstupů jsou využity řídicím programem ze 100 procent. Celý systém je situován v rozvaděčové skříni spolu s jisticími a napájecími prvky celého parkovacího domu.



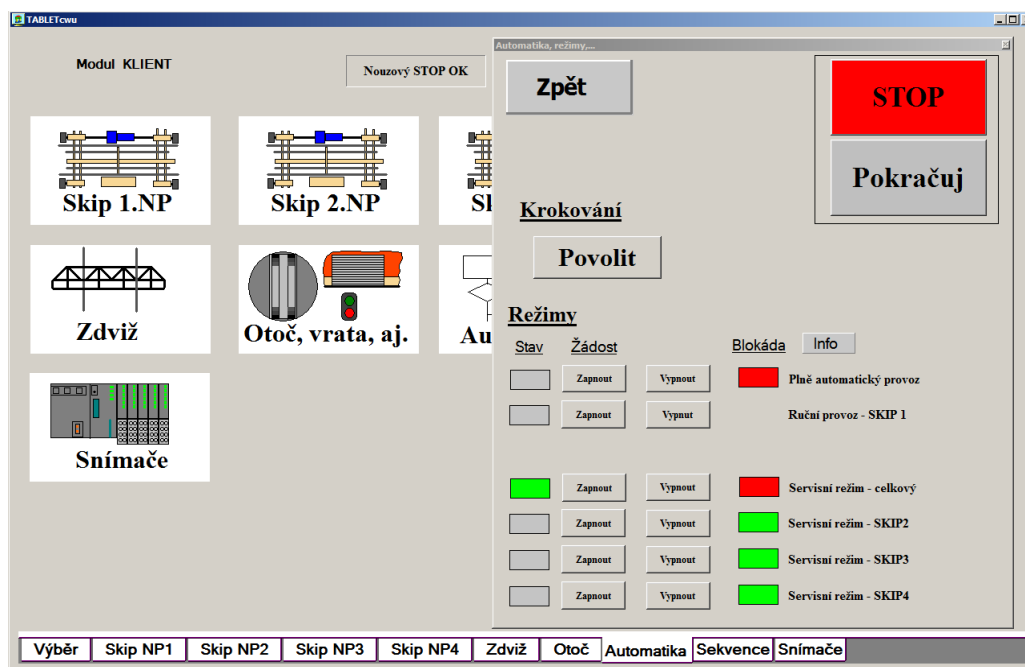
Obr. 4. Část rozvaděče s řídicím PLC.

Další řídicí jednotky v sobě obsahují jednotlivé skipy. V nich je instalována bezdrátová komunikace pomocí průmyslové wifi, která je připojena k PLC Simatic S7-1200.

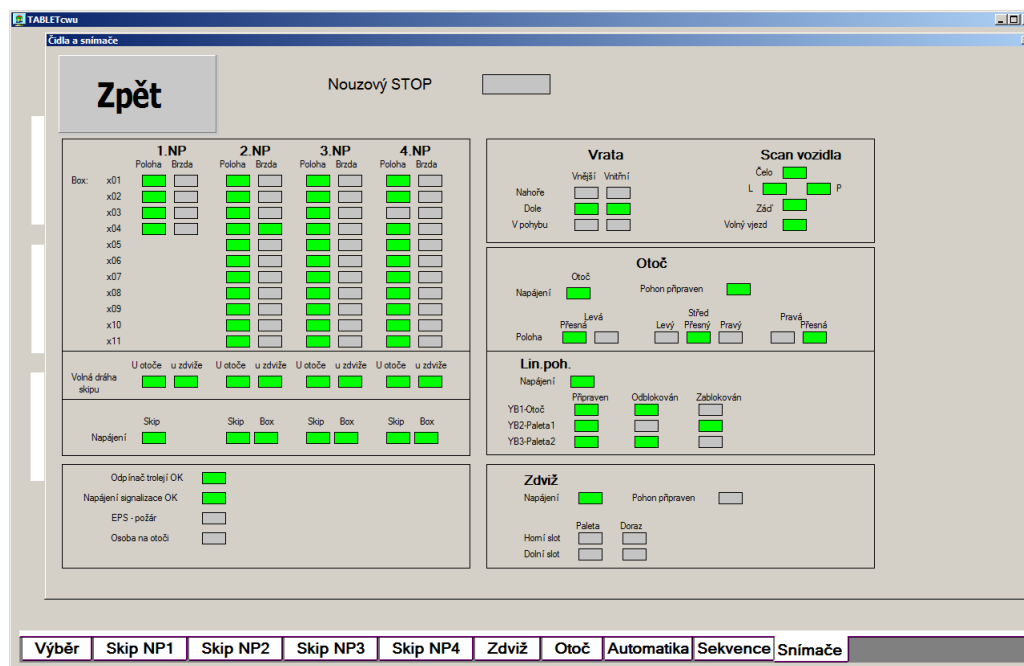
Řídicí systém je možné parametrizovat změnou programu pomocí PC operátora, které je umístěno v jedné z místností parkovacího domu. Samotný program je natolik rozsáhlý, že jeho analýza by zabrala několik kapitol samostatné knihy. Volba užití PLC byla dána realizátorem parkovacího domu. To s sebou přináší několik výhod (standartní řešení, předpokládá se dlouhý chod celé technologie bez nutnosti změny programu či vybavení) i nevýhod (limit délky programu v PLC, výkonnostní limity, rozšíření o další moduly, napojení na jiné realizované systémy, ...).

4. Vizualizace parkovacího domu

Vizualizační technologie typu SCADA/HMI jsou nedílnou součástí řídicích systémů již dlouhou řadu let. Jejich cílem je především zobrazení dat, možnost parametrizace provozu či změna chování systému operátorem a to nejen při realizaci programu pro řídicí systém, ale rovněž při jeho ověřování a provozu. Vizualizace pro parkovací dům byla realizována v prostředí ControlWeb, což je česká firma a její produkty jsou známé i studentům vysoké školy. Rovněž byly navrženy vizualizace jak pro klasické PC v místnosti operátora, tak pro mobilní zařízení, tablet, který umožňuje snadnější práci s technologií přímo v ní. Vizualizace umožňuje zobrazení základních dat ve formě srozumitelných grafických komponent a to pro hlavní části distribuovaného systému jako příjmová místnost, jednotlivé skipy, výtah nebo data z měření elektrických komponent technologie ADC (obrázek 6). Asi nejlépe vystihuje tuto skutečnost obrázek 5.



Obr. 5. Vizualizace ADC – práce s režimy.



Obr. 6. Zobrazení senzorů přítomnosti palet.

Na výše zmíněném obrázku je patrné jakým způsobem je možné kontrolovat avšak i řídit části parkovacího domu. Asi nejdůležitější součástí je možnost přepnutí automatického módu do servisního režimu, který umožňuje v třech úrovních ovládní řídit manuálně celý parkovací dům. Rozdělení na úrovně je především z důvodu ochrany částí parkovacího domu, neboť v plně manuálním režimu je možné dělat úplně vše.

Vizualizace samotná dále umožňuje sledovat trendy jednotlivých veličin či datových zdrojů v čase. Důležitou součástí je systém alarmů, které v případě kritických problémů umožňují informovat konkrétní osoby pomocí emailu či SMS zpráv a rychle tak technologii opět uvést do provozu a to i ze vzdáleného počítače s přístupem do intranetu VŠB-TU Ostrava.

Zdrojem dat pro vizualizaci je instalovaný OPC server, který je zprostředkovává jednotlivým částem technologie. Důležitý je především pro vizualizaci, ale taktéž další systémy, které jsou plánované v budoucnu připojit k parkovacímu domu a jsou s touto platformou kompatibilní.

5. Diagnostika parkovacího domu

Neméně důležitou součástí parkovacího domu je diagnostický nástroj realizovaný pomocí SCADA/HMI nástroje Reliance. Jeho úloha proti předchozímu vizualizačnímu systému je zcela jiná. Při řízení technologie je potřeba splnit některé úkony, které jsou závislé na splnění mnoha podmínek. Například není možné spustit vyložení palety s automobilem do výtahové šachty bez přítomnosti výtahu. Znamenalo by to pád a poškození vozidla i parkovacího domu. Na obrázku 7 je ukázka výstupu aplikace pro postmortem přehrávání událostí v ADC. Je patrné, jak se v čase mění prvky na obrazovce, které představují jednotlivé logické posloupnosti a jejich splnění (zelená barva). Velký blok, který se skládá z menších, pak nemůže být vykonán, pokud všechny části nejsou korektně ukončeny, splněny. Tento nástroj umožňuje i přehrávat vykonávání řídicího programu v minulosti a hledat tak možné příčiny problémů, které vznikají při reálném provozu. Zde je třeba zdůraznit, že se jedná o elektromechanický systém, který je vystaven extrémním podmínkám provozu (změny počasí, teplot, vlhkosti) a různým aktivitám jeho potencionálních uživatelů.

zavřít	Vstupní vrata otevřena	B 1 Skip < 2 > k místu < 207 > Zdvíž-HH na < 2 > NP	Skip < 2 > -cíl: < 207 > -akt: < 207 >	Skip < 2 > bez palety (snímač 2)	Volná dráha skipu - zdvíž	
			Data prázdné palety č. < 207 > platná	Skip < 2 > bez palety (snímač 1)	Volná dráha skipu - otoč	Komunikace s PLC skipu < 2 > je O. K.
otevřít	Vnitřní vrata nejsou v dolní koncové poloze	B 2 Auto z místa < 207 > na skip < 2 >	Auto najíždí na skip < 2 > -voln. dráha přer.	Paleta v boxu < 207 > nepřítomna	Volná dráha skipu - otoč	Skip < 2 > úspěšně ukončil převzetí auta
			Auto najíždí na skip < 2 > -brzda stlačená	Teleskop a řetěz ve střední poloze	Volná dráha skipu - zdvíž	Komunikace s PLC skipu < 2 > je O. K.
o skipu	Vnitřní vrata otevřena	B 3 Skip < 2 > s autem ke zdvíž	Skip < 2 > -cíl: < 207 > -akt: < 207 >	Zdvíž-HH bez palety (doraz)	Komunikace s PLC skipu < 2 > je O. K.	
	Vstupní vrata zavřena		Otoč v poloze čelem ke skipu	Zdvíž-HH je na < 2 > NP	Zdvíž-HH bez palety (spodek)	
Přehrávač záznamů postmortu		B 4 Auto ze skipu < 2 > na zdvíž-HH	Auto najíždí do zdv. - voln. dráha přer.	Zdvíž-HH - Paleta přítomna (doraz)	Volná dráha skipu - zdvíž	Komunikace s PLC skipu < 2 > je O. K.
Počátek přehrávání: 13.7.2015 10:02:00 Rychlost přehrávání: Normální Stav: Přehrávání pozastaveno Datum záznamu: 13.7.2015 Čas záznamu: 10:02:27,620			Zdvíž-HH - Paleta přítomna (spodek)	Teleskop ve střední poloze	Skip < 2 > úspěšně ukončil předání auta na zdvíž	
		B 5 Zdvíž-DD na 1.NP	Zdvíž-DD je na 1.NP	Zdvíž-DD bez palety (spodek)	Komunikace s PLC skipu 1 je O. K.	
			Skip 1 -cíl: 112 -akt: < 0 >	Zdvíž-DD bez palety (doraz)		
		dvíže řer.	Zdvíž-DD - Paleta přítomna (doraz)	Volná dráha skipu - otoč	Skip 1 úspěšně ukončil předání pal. na zdvíž	
		paleta	Teleskop ve střední poloze	Volná dráha skipu - zdvíž	Komunikace s PLC skipu 1 je O. K.	

Obr. 7. Postmortem prohlížeč událostí.

6. Navazující projekty

Parkovací dům na půdě Vysoké školy báňské otevírá nové možnosti realizace dalších projektů a to především díky svému cíli, která směřuje k úvodu zmíněnému konceptu smart city. Mimo jiné to znamená využití zelené energie pro provoz budovy. V roce 2016 byla realizována úprava parkovacího domu pro možnost jeho provozu v ostrovních podmínkách. Na střeše parkovacího domu je instalována fotovoltaická elektrárna o výkonu 5kW a na místě jedné ze speciálních palet akumulací systém s měniči, které umožňují bezproblémový chod ADC na baterie. V případě nutnosti, z důvodu absence slunečního počasí, pak řídicí systém umožňuje přepnout na stávající řešení napájení z energetické sítě, případně zapnutí diesलगregátu.

Vzhledem k trendům na trhu osobních automobilů bylo taktéž přihlédnuto k možnosti využít tuto zásobu energie pro nabíjení elektromobilu, který je v současnosti na VŠB provozován, případně naopak využít elektromobil, respektive jeho baterie, jako zdroj energie pro chod parkovacího domu. Vzhledem k nutnosti upravit palety, zajistit vše bezpečnostními prvky a hlavně za cenu nulových změn konceptu parkování je tento úkol plánován na rok 2017. Především co se týče přenosu energie v obou směrech elektromobil/budova se jedná o zajímavý experiment.

Další výzvou je integrace provozních veličin do nadřazeného systému typu MES (Manufacturing Execution Systems), které stojí na rozhraní výrobního informačního systému a systému pro automatizaci provozu. Ten může přinést jiný pohled na provoz ADC, ať už z pohledu energetického zdroje či využití parkovacích míst, čili především ekonomických ukazatelů.

Za zmínku stojí rovněž náhrada některých komponent vestavěnými řídicími systémy s reálným časem, které by umožnily flexibilnější a rychlejší funkci, což souvisí především v rychlosti dodání parkovaného automobilu pro jeho výjezd. Čistě softwarová záležitost je pak optimalizace a příprava ADC na vyparkování několika vozidel za sebou na základě požadavků uživatele (ten si zvolí čas vyparkování a při jeho příchodu již může být auto připraveno v odbavovacím prostoru, čili stačí identifikace k otevření vnějších vrat).

7. Závěr

Cílem článku byl především popis širokého spektra hardwarových a softwarových technologií, se kterými je možné se setkat při realizaci obdobného projektu. Zdá se, že dnešní společnost je zcela oddána využití informačních technologií a koneckonců k extrémnímu nárůstu vede i velmi skloňovaná 4. průmyslová revoluce. Je důležité si uvědomit, že než dojde k zobrazení reálných dat v jakémkoli informačním systému, je nezbytné tato data naměřit pomocí elektronických senzorů, zpracovat, interpretovat a pak vhodným způsobem poskytnout do patřičného datového úložiště. Mnohdy jsou právě tyto činnosti mnohem zajímavější a přínosnější, než využití grafického frameworku pro mobilní aplikaci a zobrazení čísla bez znalosti rozměru a fyzikální podstaty.

Literatura

- [1] HORÁK, Bohumil, Kristýna FRIEDRISCHKOVÁ, Jiří KAZÁRIK, Jana NOWAKOVÁ a Zdeněk SLANINA. Elektromobilita II. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3532-7.
- [2] HORÁK, Bohumil, Kristýna FRIEDRISCHKOVÁ, Zdeněk SLANINA, Vít OTEVŘEL a David VALA. Smart sítě a jejich infrastruktura. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3534-1.
- [3] Misak, S., Prokop, L., Bilik, P., Krejci, P. Evaluation of power quality in off-grid power system (2015) *Komunikacie*, 17 (1A), pp. 71-76.

METODY POSUZOVÁNÍ PŮVODNOSTI POLOVODIČOVÝCH SOUČÁSTEK

Petr Neumann, Milan Navrátil

Fakulta aplikované informatiky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín

neumann@fai.utb.cz; navratil@fai.utb.cz

Abstrakt:

Výskyt nepůvodních a napodobených výrobků postihuje prakticky všechny obory spotřebního zboží a zboží pro speciální a citlivé aplikace. Padělky elektronických součástek zahrnují velmi široký sortiment součástek od přesných stabilních odporů až po složité obvody velké integrace, jako jsou procesory a aplikačně specifické obvody. Narůstající výskyt padělků elektronických součástek je podchycen zhruba od počátku 70. let minulého století s tím, že v posledních letech exponenciálně narůstá. Nebezpečí s možnými fatálními následky představuje především průnik padělků součástek do citlivých elektronických systémů, například v oblasti lékařské, vojenské a letecké techniky. Při detekci padělků elektronických součástek se používají různé analytické metody zaměřené především na parametry, u nichž nelze paděláním dosáhnout přesné shody s originálním výrobkem. Testy zaměřené na posouzení původnosti určité skupiny součástek můžeme rozdělit na nedestruktivní a destruktivní. Mezi účinné nedestruktivní metody patří elektrické parametrické testy na různých úrovních složitosti. Zjednodušeným ale přesto účinným testem může být porovnávání voltampérových charakteristik se vzorem, jehož původ je autentický a historie známá. Článek zmiňuje i další metody, jako je rentgenová analýza, ultrazvuková analýza, zpřístupnění zapouzdřeného systému na čipu pro optickou kontrolu a další.

Proč mohou být některé nepůvodní výrobky nebezpečné

Výskyt padělaných výrobků renomovaných značek v oblasti spotřebního zboží a oděvního průmyslu je záležitost všeobecně známá a často popisovaná v denním tisku. Například padělané oděvy představují sice z právního hlediska podvod na kupujícími a porušování práv původního výrobce, jehož výrobky napodobují, nicméně nepředstavují pro kupujícího zdravotní rizika, pokud neobsahují nebezpečné a zdraví škodlivé látky. Mezi širší i odbornou veřejností je však méně známá skutečnost, že také elektronické součástky jsou předmětem paděláním, a to v mnoha typových variantách a provedeních. Lze se setkat s padělků jednoduchých obvodů, jako jsou například kondenzátory, ale také s padělků složitějších obvodů, jako jsou mikroprocesory a další obvody vysoké integrace. Tyto padělané součástky představují celkově velmi závažné riziko pro funkčnost, životnost a spolehlivost zařízení, v nichž jsou použity. Zpráva technické skupiny americké obchodní komory [1] podrobně rozebírá situaci s pronikáním padělků do zásobovacích řetězců. Obrázek 1 ilustruje výskyt hlášení o padělcích v elektronice v rozmezí zhruba 30 let s tím, že je patrný vzrůstající trend výskytu v posledních letech.

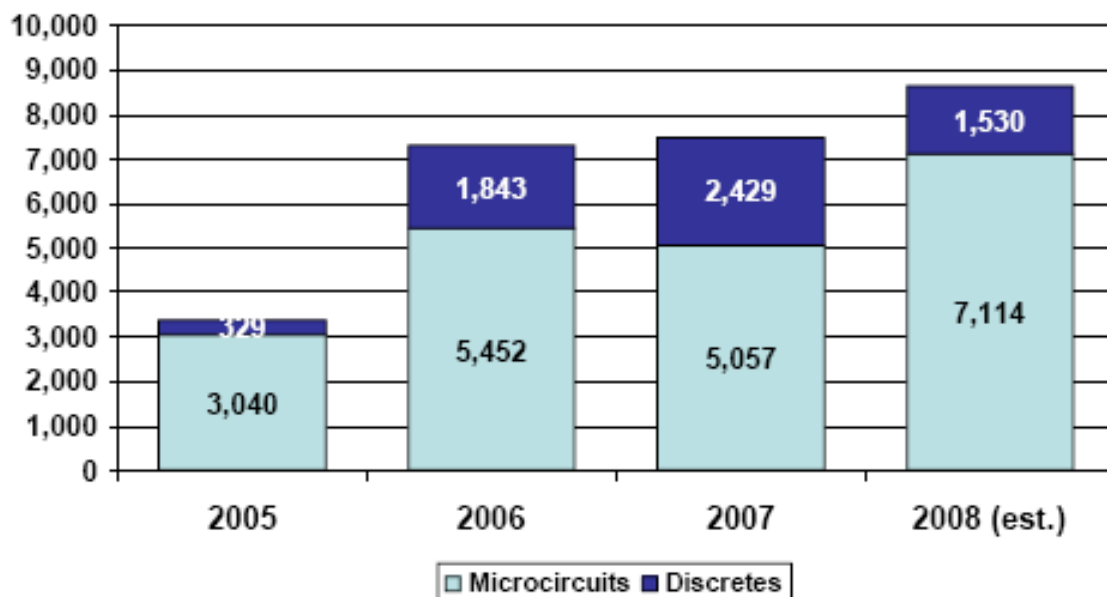


Obr. 1. Přehled zaznamenaných hlášení o padělcích obvodech [1].

Míra padělání se liší a lze ji rozdělit do několika kategorií. Ve zprávách o výskytu padělků jsou popsány případy, kdy uvnitř pouzdra součástky chyběl samotný čip, nebo chybělo částečně nebo úplně vnitřní propojení čipu na vnější kontaktní systém. Samostatnou kategorií mohou být součástky obsahující čip jiného výrobce, než je uvedeno na popisce pouzdra, což představuje i fenomén přeznačování součástky po předchozím odstranění původního popisu, například obroušením. Přeznačování a povrchová úprava součástek může souviset i s dalším typem padělků, kterým jsou již použité součástky z vyřazených elektronických modulů. Tyto součástky jsou vyjímány z původních sestav, často velmi primitivními prostředky a postupy, povrchově opraveny a upraveny, aby s novým popisem předstíraly, že jde o nové výrobky renomovaných výrobců s příslušnou kvalitou a spolehlivostí. Určitou část padělků pochopitelně tvoří i kopie obvodů zavedených značek vyrobené v padělatelských provozech méně dokonalými technologiemi a s výrazně horšími parametry a spolehlivostí.

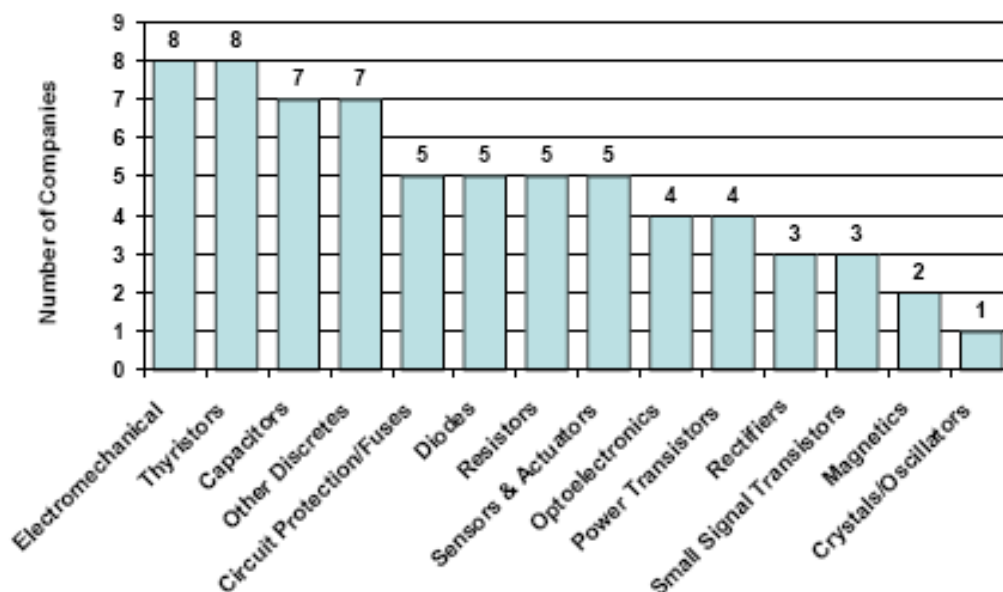
Obchodování s padělkami je všeobecně hodnoceno jako velmi výnosné. Ve svých důsledcích však toto „obchodování“ představuje závažná až fatální společenská, hospodářská a bezpečnostní rizika. Vlivem proměnlivé intenzity ekonomické krize v posledních letech, úsporným opatřením i omezeným výrobním kapacitám renomovaných výrobců v určitých případech a pro určité typy součástek, mohou nastávat stále častěji situace, kdy do ustálených dodavatelských řetězců pronikne nespolehlivý zdroj. Příležitost pro průnik padělků představuje nižší cena a dostupnost padělků, a to jak moderních obvodů, tak také obvodů, jejichž běžná sériová výroba byla utlumena nebo zastavena. Potřeba starších elektronických obvodů souvisí s nutností udržovat v provozu i starší zařízení komerčního, průmyslového a vojenského charakteru s plánovanou a požadovanou delší životností. Tím se vytváří lákavá příležitost pro repasované použité součástky a pro padělkami originálních výrobců.

Na obrázku 2 je ilustrace poměrného zastoupení zjištěných padělků diskrétních součástek a integrovaných obvodů v rozmezí let 2005 až 2008 v rámci průzkumu technické skupiny americké obchodní komory [1].



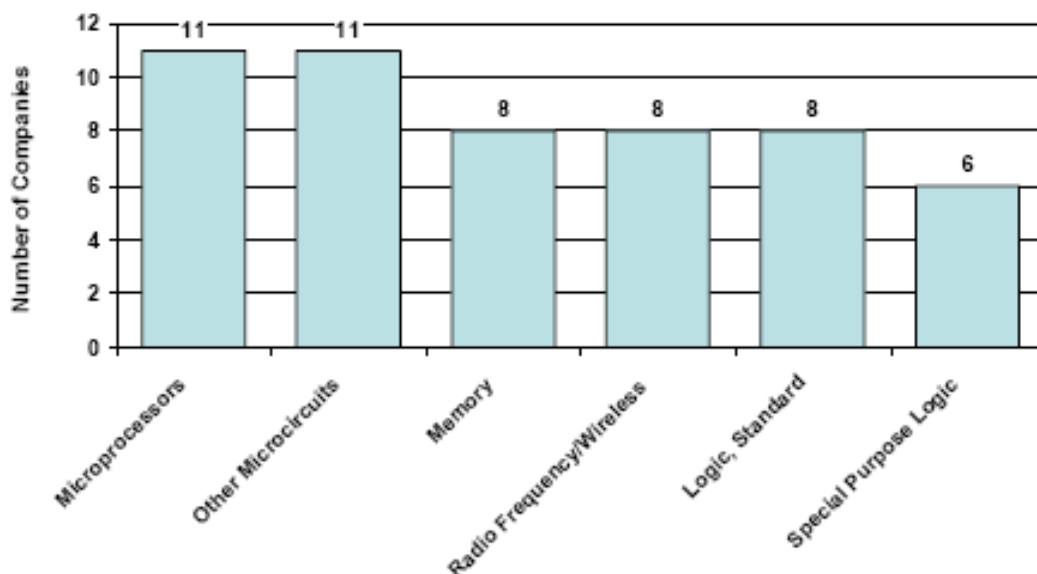
Obr. 2. Poměrné zastoupení zjištěných padělků diskretních a integrovaných součástek [1].

Na obrázku 3 je ilustrace zastoupení jednotlivých typů padělků diskretních součástek hlášených výrobcí originálních součástek v USA podle výsledků průzkumu americké obchodní komory [1].



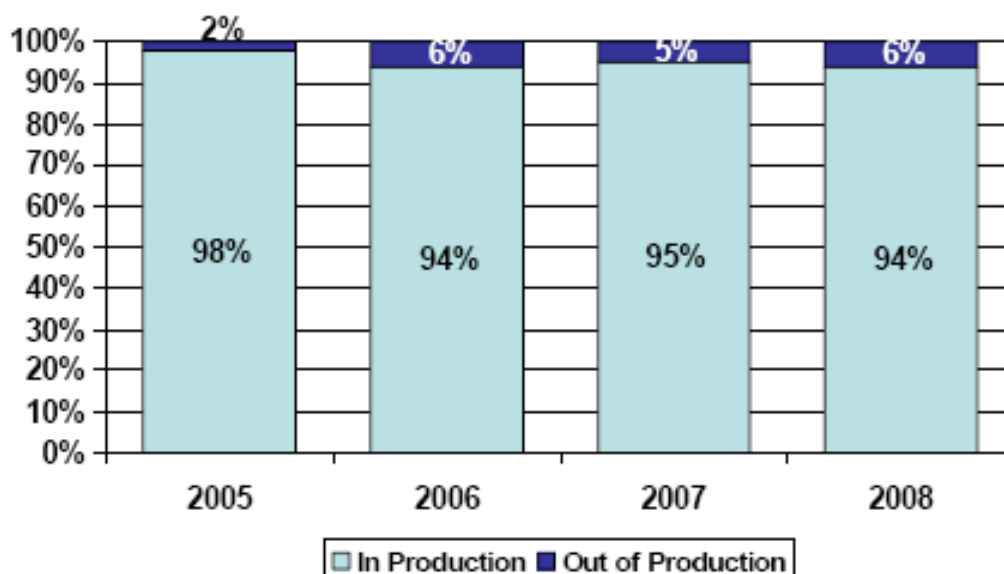
Obr. 3. Zastoupení typů padělků diskretních součástek [1].

Na obrázku 4 je ilustrace zastoupení jednotlivých typů padělků integrovaných obvodů hlášených výrobcí originálních obvodů v USA podle výsledků průzkumu americké obchodní komory [1].



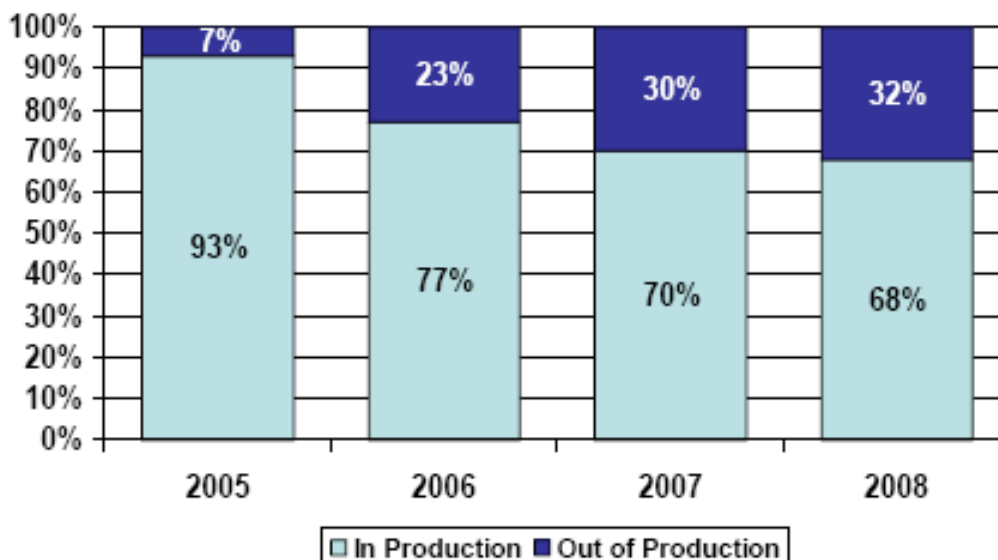
Obr. 4. Zastoupení typů padělků integrovaných obvodů hlášených výrobci [1].

Obrázek 5 ilustruje poměrné zastoupení padělků diskretních obvodů v aktivní výrobě (světle modrá barva) a mimo aktivní výrobu (tmavě modrá barva) v rozmezí let 2005 až 2008 podle výsledků průzkumu technické skupiny americké obchodní komory [1].



Obr. 5. Poměrné zastoupení padělků diskretních součástek v aktivní výrobě a mimo aktivní výrobu [1].

Obrázek 6 ilustruje poměrné zastoupení padělků integrovaných obvodů v aktivní výrobě (světle modrá barva) a mimo aktivní výrobu (tmavě modrá barva) v rozmezí let 2005 až 2008 podle výsledků průzkumu technické skupiny americké obchodní komory [1].



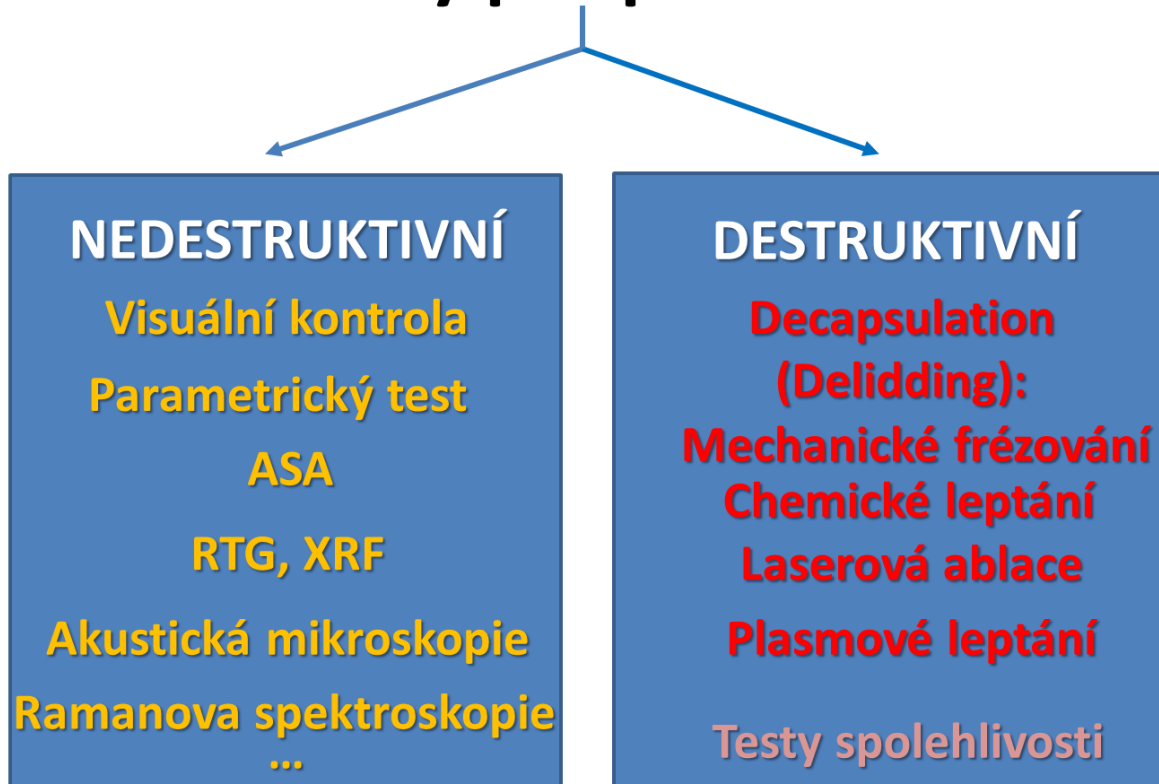
Obr. 6. Poměrné zastoupení padělků integrovaných obvodů v aktivní výrobě a mimo aktivní výrobu [1].

Průnik padělků elektronických součástek může usnadňovat momentální nedostatek určitého typu na trhu a do jisté míry i zmíněný tlak na snižování nákladů, který upřednostňuje výhodnější cenové nabídky. Tento ekonomický aspekt může sehrát významnou roli také u součástek mimo aktivní výrobu, poněvadž jejich zhotovení u původního výrobce představuje problém výrazně vyšší ceny a výrazně delší dodací lhůty. Padělatelé pak mají tyto součástky většinou pohotově v nabídce díky jejich dostupnosti díky propracované, nicméně diskutabilní, technologii jejich extrakce z použitých zařízení v rámci ilegálních smetišť elektroniky.

Metody detekce nepůvodních polovodičových součástek

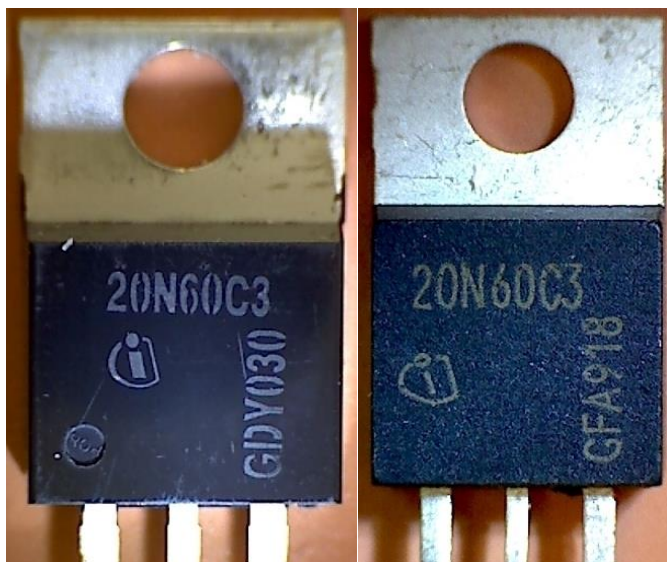
Manipulace s použitými součástkami a výroba padělků původních značek zanechává nutně určité stopy v odlišnosti od součástek originálních výrobců. Povaha těchto odlišností je vodítkem pro návrh metody jejich odhalování. Podle stupně ovlivnění vlastností posuzované součástky můžeme rozdělit detekční metody do dvou skupin, tedy na nedestruktivní metody a na destruktivní metody. Nedestruktivní metody nezanechají na součástce žádné stopy a nijak neovlivní její parametry. Pokud by se těmito metodami nepodařilo odhalit, že se jedná o součástku nepůvodní a nevhodnou pro danou aplikaci, mohla by být hypoteticky a s jistou mírou rizika použita do sestavy elektronického modulu. Vzhledem k tomu, že ale není možné odpovědně stanovit míru onoho rizika, je vhodné u takové skupiny součástek provést alespoň na několika vybraných kusech i destruktivní zkoušky. Součástky po destruktivním testu nemusí nutně ztratit svou funkčnost, jako například při šetrně provedené ablaci materiálu pouzdra nad systémem na čipu. Zachování funkčnosti po ablaci umožňuje kromě optické kontroly označení systému na čipu a technologického rukopisu i provedení dalších testů, jako například rozložení tepelného pole v ploše čipů při funkční aktivaci. Orientační rozdělení metod použitelných pro posouzení původnosti polovodičových součástek je na Obr. 7.

Metody pro posouzení

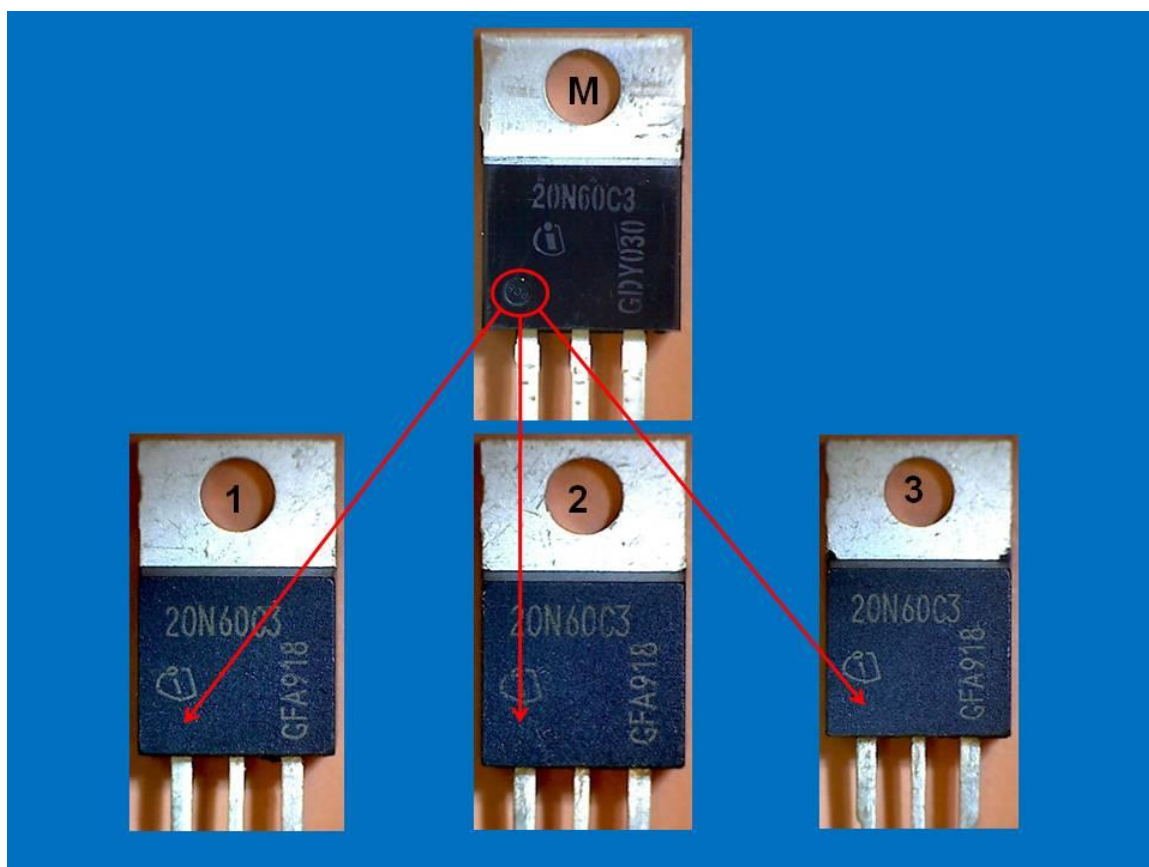


Obr. 7. Orientační rozdělení hodnotících metod.

Pozornost při vizuálním odhalování padělků obvodů se soustřeďuje na vzhledové odlišnosti ve značení, jeho struktuře, velikosti písma, umístění částí popisu, loga výrobce, kódování data výroby, tepelné vlasy apod. Spolu s popisem se zkoumá zrnitost povrchu a případná přítomnost vrstev kryjících stopy po odstranění původního popisu [3]. Ilustrace vizuálního porovnání způsobu a kvality popisu námi vyhodnocovaných vzorků je na Obr. 8. Na první pohled je patrná i různá struktura materiálu pouzdra a chybějící vlasy u podezřelé součástky. V rámci i globálních výrobních provozů jednoho autentického výrobce by takové rozdíly nebyly možné. Mezi vzhledové odlišnosti můžeme počítat i geometrii pouzdra součástky, jeho rozměry, zkosení hran, zaoblení rohů, rozteč, tvar i rozměry vývodů a podobně. Tyto odlišnosti se kromě vizuální kontroly zjišťují i měřením, poněvadž rozměry a jejich tolerance jsou u autentického výrobce pevně definovány, kdežto u nepůvodních součástek se mohou dost podstatně lišit.



Obr. 8. Ilustrace odlišností v popisu i provedení loga vzorového tranzistoru a jednoho z námi testovaných vzorků.

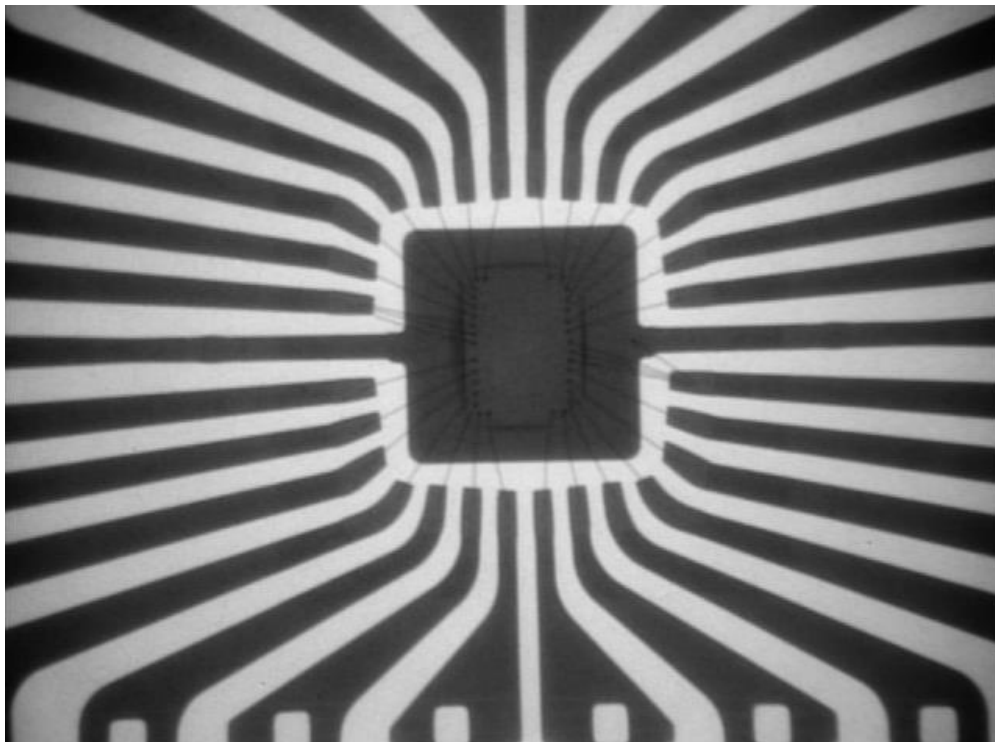


Obr. 9. Celý soubor vzorků k analýze (1,2,3) s určeným vzorem (M) pro porovnání.

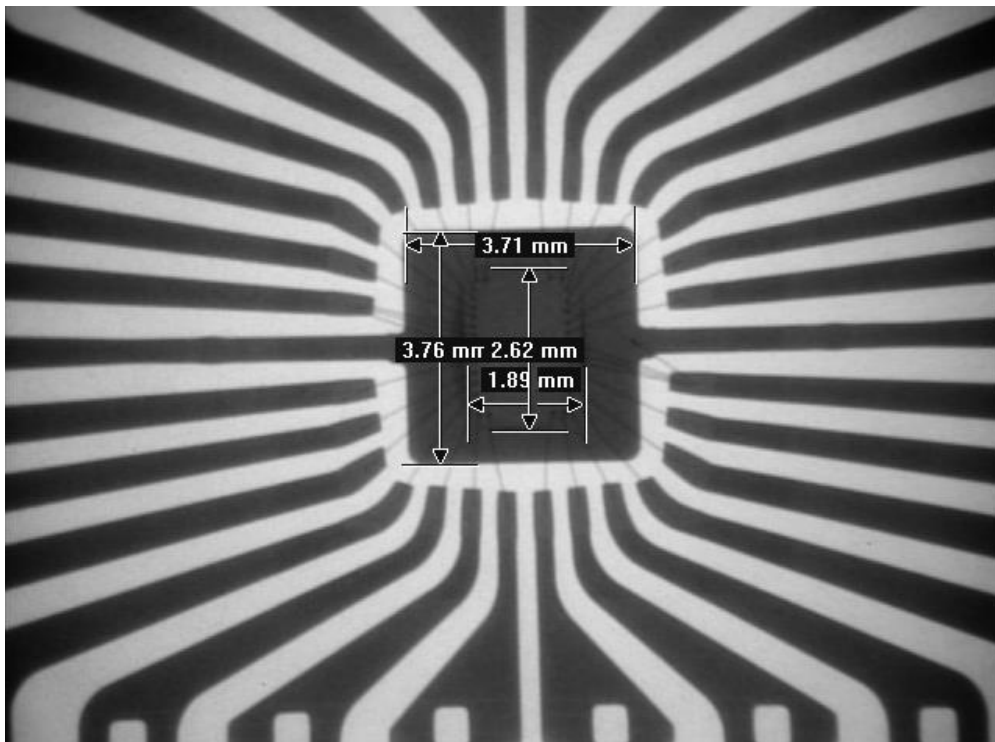
Na Obr. 9 je celá skupina 3 vzorků k hodnocení a jednoho autentického vzoru výkonového tranzistoru 20N60C3 z produkce firmy Infineon. Šípkami jsou zvýrazněny chybějící vlysy pouzdra u porovnávaných vzorků.

Výrazné možnosti má rentgenová analýza, která umožňuje nedestruktivně zpřístupnit informaci o obsahu a stavu uvnitř pouzdra testované součástky. Takto lze zjistit přítomnost či nepřítomnost čipu uvnitř pouzdra, jeho posun ze standardní středové pozice, případně

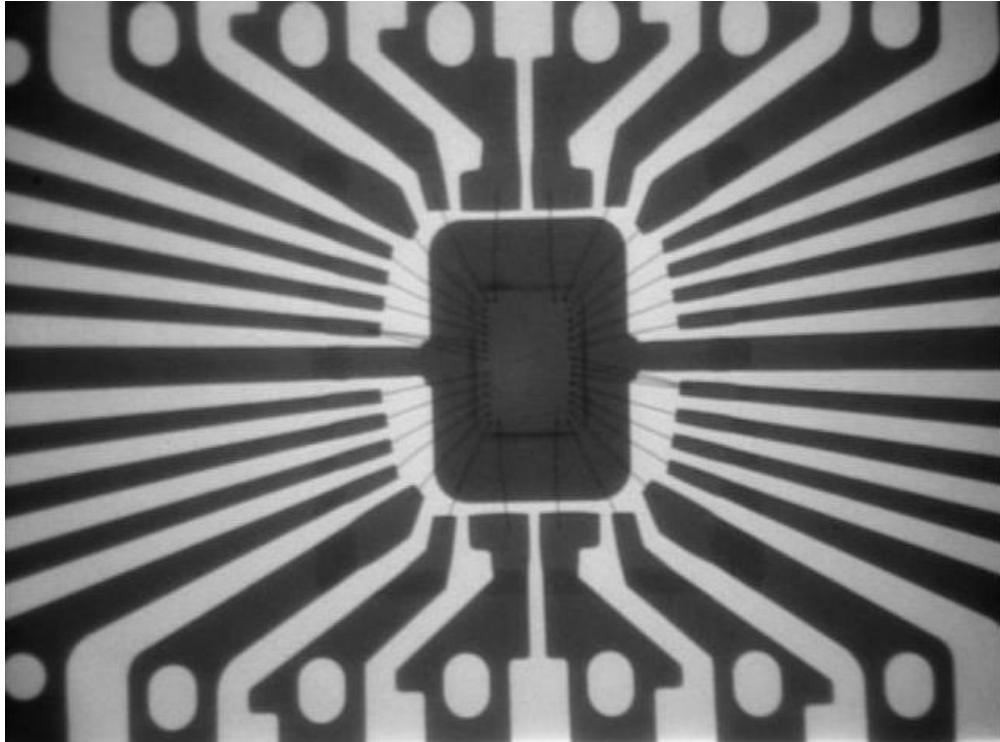
natočení vůči nosné základně a jeho propojení s vnější kontaktní soustavou, přítomnost rozměrově odlišného čipu, odlišné provedení vnitřního kontaktního systému a další rentgenově kontrastní anomálie. Na Obr. 10a,b a 11a,b jsou příklady rentgenového zobrazení obsahu pouzdra dvou vzorků námi testované paměti AT27C256.



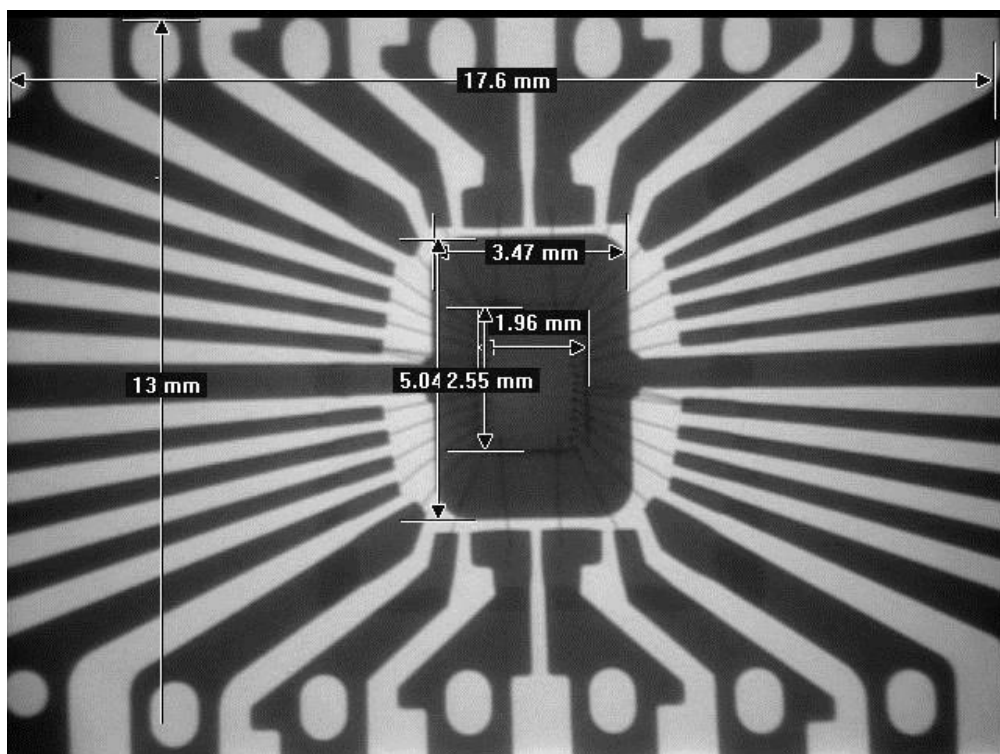
Obr. 10. Rentgenový snímek jednoho vzorku paměti AT27C256.



Obr. 10b. Rentgenový snímek téhož vzorku s orientačními rozměry základních struktur.



Obr. 11b. Rentgenový snímek druhého vzorku těže paměti AT27C256.

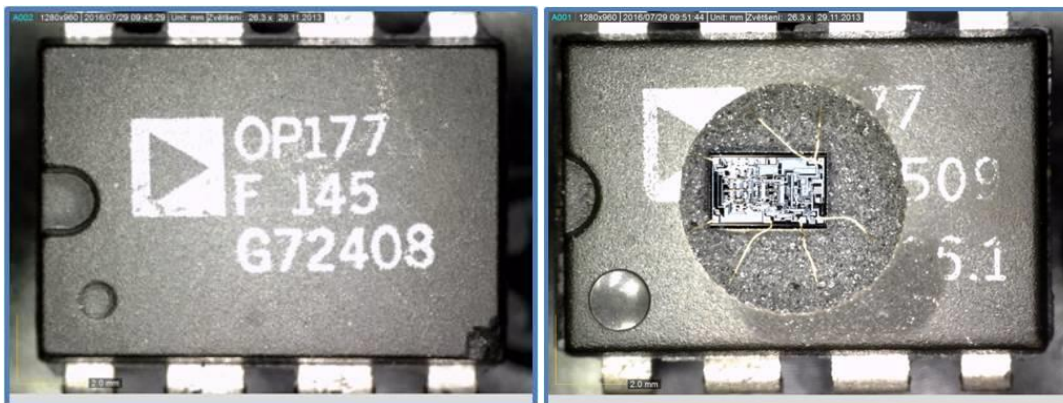


Obr. 11b. Rentgenový snímek téhož vzorku s orientačními rozměry základních struktur.

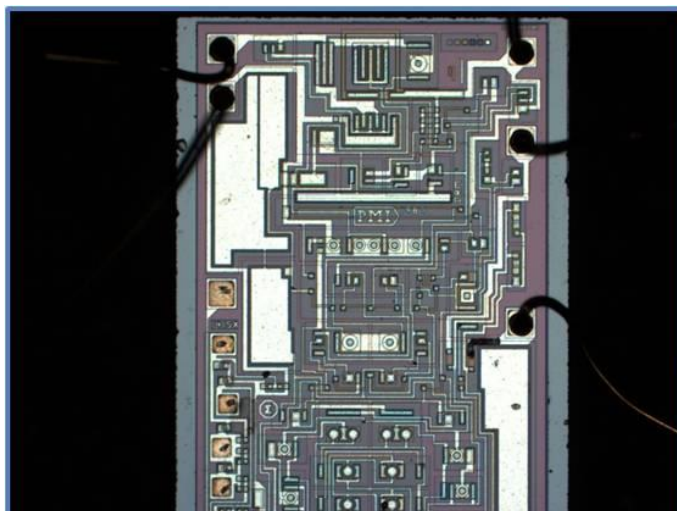
Z rentgenových snímků je zřejmý jiný tvar a rozměr nosné základny čipu i jinak provedený systém vnitřní části vnějších vývodů součástky. V takovém případě je již žádoucí zpřístupnit systém na čipu pro optickou kontrolu se zaměřením na označení čipu, logo a další detaily, které budou s největší pravděpodobností odlišné.

Za destruktivní metodu vyhodnocení vzorku součástky považujeme odvíčkování kovového nebo keramického hermetického pouzdra součástky nebo náročnější ablací materiálu

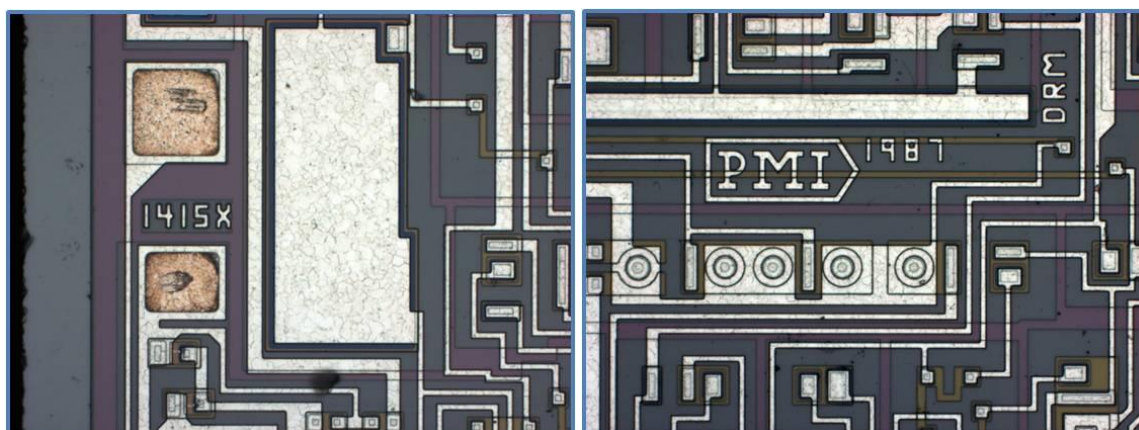
nehermetického pouzdra nad systémem na čipu. Jak již bylo zmíněno, zpřístupnění čipu pro optickou kontrolu může proběhnout s cílem pouhého optického ověření shody či neshody popisu čipu s popisem pouzdra. V případě potřeby však lze funkčnost součástky zachovat a následně provést funkční testy s cílem hlubšího poznání závad a možných příčin potenciálního selhání. Na obrázcích 12, 13 a 14 jsou ilustrace výsledku zpřístupnění čipu.



Obr. 12. Analyzovaný operační zesilovač OP177 – popis pouzdra a čip po ablaci materiálu.



Obr. 13. Čip domnělého operačního zesilovače OP177 při zvětšení 50x.

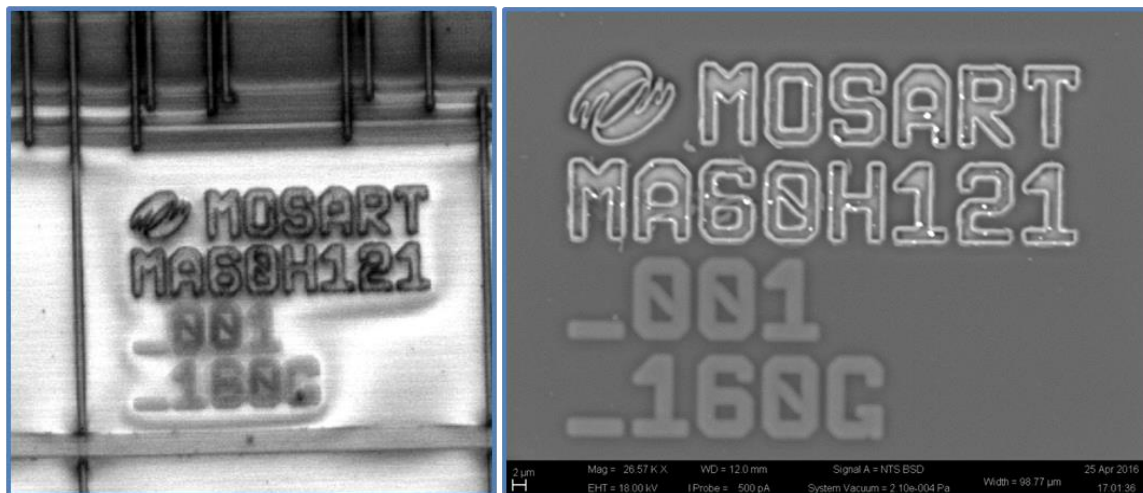


Obr. 14. Čip domnělého operačního zesilovače OP177 při zvětšení 200x.

Jednalo se o domnělý výrobek firmy Analog Devices, velmi přesný operační zesilovač OP177, který jsme obdrželi pro naše experimenty jako vadný po jeho výměně v měřicím přístroji během opravy. Po zpřístupnění systému na čipu kombinovanou ablací pomocí laseru

a finálního chemického odleptání ochranné vrstvy materiálu pouzdra nad čipem jsme zjistili, že v pouzdře se nachází čip od firmy PMI a byl vyroben v roce 1987. Na základě tohoto náhodného zjištění byla s firmou dohodnuta organizační opatření při nákupu náhradních dílů a výměně vadných polovodičových součástek, především integrovaných obvodů a naše účast v procesu ověření původnosti náhradních součástek.

Po zpřístupnění systému na čipu lze kromě optické analýzy aplikovat i další vyhodnocovací metody, jak ilustruje následující obrázek 15.



Obr. 15 Logo a popis odkrytého čipu zobrazené konfokálním mikroskopem (vlevo) a pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (vpravo).

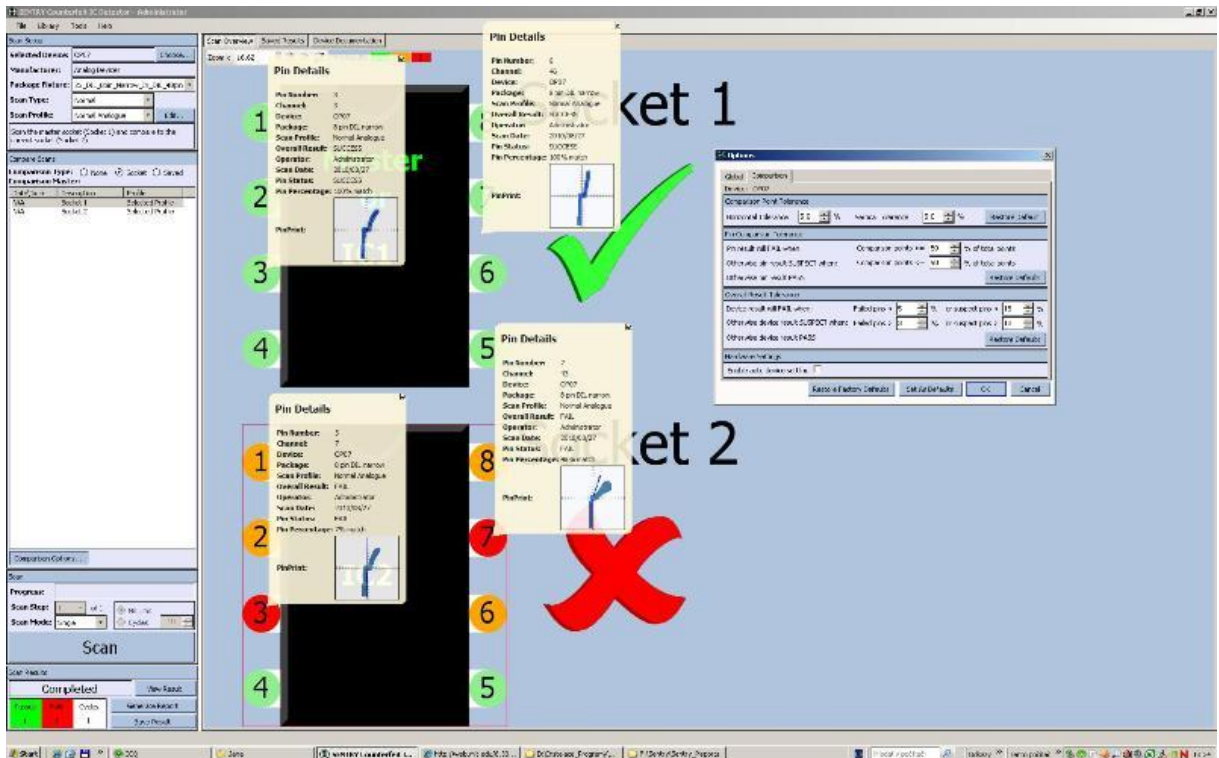
Pro posouzení původnosti polovodičových součástek lze v podstatě použít jakoukoliv metodu, která dokáže rozlišit jakékoliv rozdíly v provedení originální a posuzované součástky. Pomocí fluorescenční rentgenoskopie (XRF) lze nedestruktivně určit materiálové složení slitiny pokovení vývodů pro případné ověření RoHS kompatibility nebo historii pokovení vývodu. Akustická mikroskopie pak může velmi citlivě a kontrastně zobrazit materiálové nehomogenity, delaminaci vrstev a jakékoliv rozhraní s rozdílnou akustickou impedancí s rozměrem a hloubkou závislou na použitém kmitočtu a provedení ultrazvukové sondy.

V závěru našeho sdělení bychom se ještě vrátili k jedné zajímavé nedestruktivní metodě, která stála u zrodu našich laboratoří pro vyhodnocování původnosti polovodičových součástek. Jedná se o metodu porovnávání voltampérových charakteristik snímaných vždy mezi dvojicemi vývodů posuzované součástky s odpovídajícími dvojicemi vývodů součástky vzorové. Tato již poměrně letitá metoda je v diagnostice známá pod názvem Analogová příznaková analýza (ASA – Analog Signature Analysis). Vzhledem k novým možnostem, které nabízí pokroky v obvodových řešeních a softwarové podpoře, byla tato metoda velmi úspěšně aktivována právě v oblasti posuzování původnosti součástek. Voltampérové charakteristik dvojic vývodů jsou aktuálně nazývány „otisky“ (Pin Prints) a jejich odchylky jsou překvapivě dost průkazné pro nepůvodní součástky i při hrubším nastavení tolerančního rozmezí. Na Obr. 16 je příklad takového analyzátoru, který je ve výbavě naší výzkumné laboratoře i laboratoře pro výuku diagnostiky. Přístroj má řadu režimů od plně automatického po možnost vlastní nastavení parametrů v rámci technických specifikací přístroje. Lze zohlednit výrobní rozptyl v rámci šarže nebo mezi šaržemi původního výrobce pomocí průniku vzorových charakteristik ze zvoleného počtu vzorových součástek, aby tento rozptyl neovlivňoval samotné vyhodnocování odlišnosti mezi původním výrobcem součástky a danou skupinou posuzovaných vzorků.

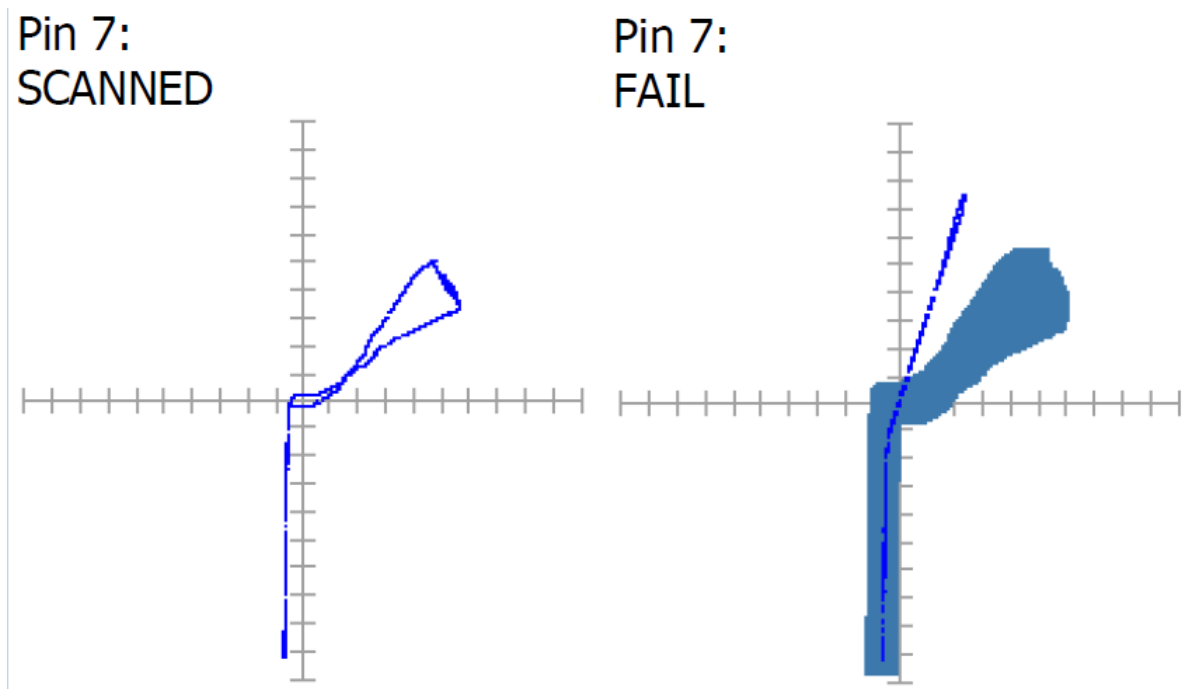


Obr. 16. 256 kanálový přístroj pro komparační analýzu integrovaných obvodů s univerzálním kontaktním adaptérem.

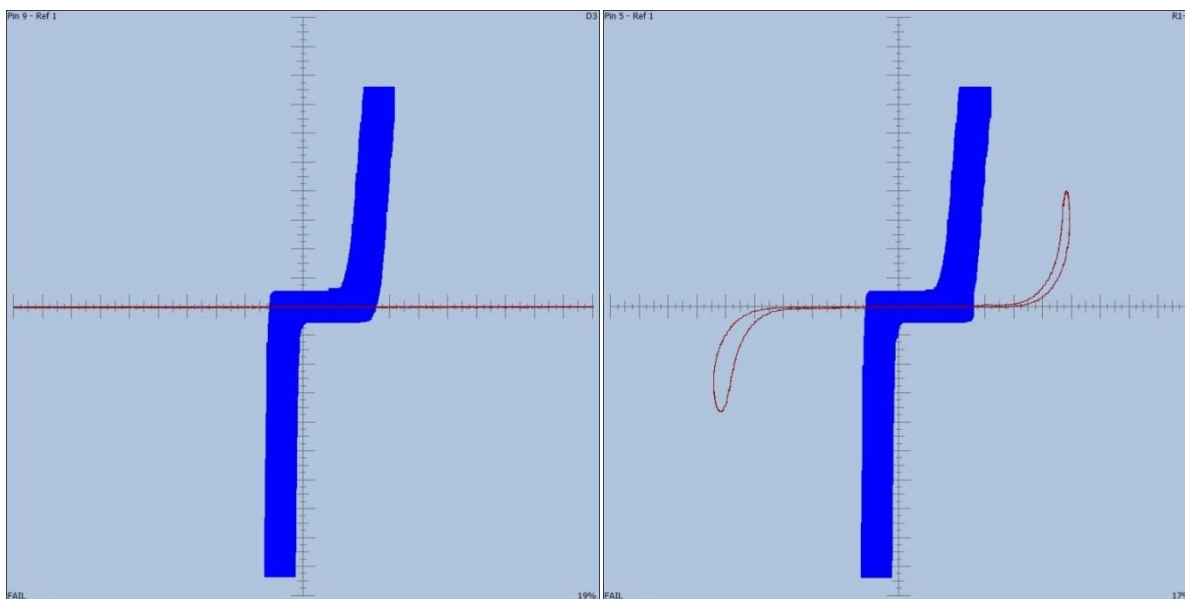
Na dalších obrázcích jsou pak příklady voltampérových charakteristik, zaznamenaných při úvodní fázi posuzování původnosti předložené skupiny vzorků. Obrázky 17 a 18 ilustrují výsledek porovnání originálního operačního zesilovače OP07 (ultra nízký ofset vstupního napětí) firmy Analog Devices s operačním zesilovačem stejného označení, ovšem od alternativního dodavatele. Obr. 17 zachycuje obrazovku aplikačního programu vyhodnocovací sestavy po dokončení porovnávacího testu s oběma součástkami připojenými ke kontaktnímu rozhraní přístroje. Současně jsou aktivovány doplňující možnosti orientačního grafického zobrazení otisků vybraných vývodů. Na Obr. 18 je vlevo zobrazen vzorový otisk vývodu č. 7 originální součástky, vpravo je zobrazen otisk vyhodnocované součástky s tolerančním polem $\pm 5\%$ odvozeným z otisku vzorové součástky. Na Obr. 18 jsou otisky vývodu č. 5 a vývodu č. 9 dalšího integrovaného obvodu (4 bitového procesoru), který byl až v sestavě modulu na testeru vyhodnocen jako problematický s podezřením na nefunkční vývod č. 9. Voltampérová charakteristika signalizovala otevřený obvod (nepropojení kontaktní plošky čipu s vývodem), což potvrdila rentgenová analýza na obrázcích 20 a 21. Na rentgenových snímcích je patrná i nižší úroveň technologie vnitřního propojování, což ukazuje i voltampérová charakteristika vývodu č. 5 na obrázku 19 vpravo.



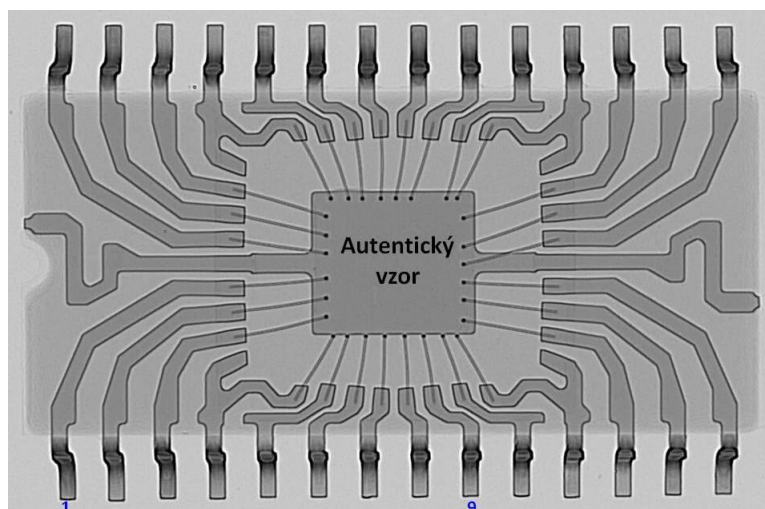
Obr. 17. Příklad výsledku porovnávacího testu obvodu OP07 s tabulkou nastavení tolerancí výběru a orientačním zobrazením grafického výsledku u vybraných vývodů.



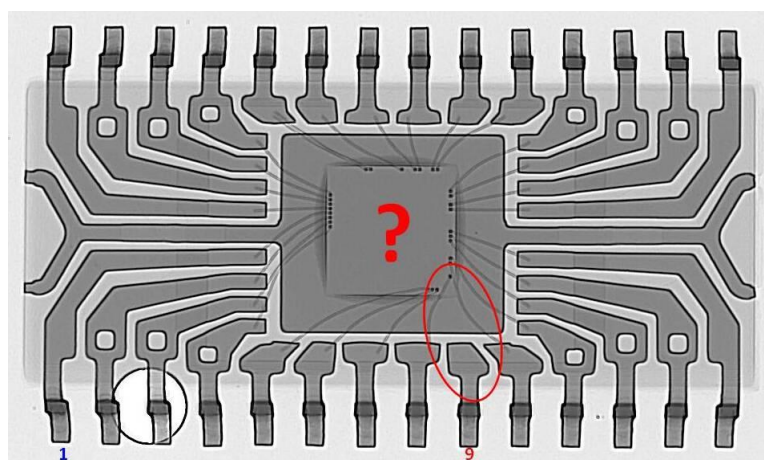
Obr. 18. Příklad zaznamenané vzorové charakteristiky vývodu č. 7 vzorového obvodu OP07 (vlevo) a charakteristiky včetně tolerančního rozmezí $\pm 5\%$ vývodu č. 7 vyřazeného obvodu OP07 (vpravo).



Obr. 19. V-A charakteristika vývodu č.9 (vlevo) a vývodu č.5 (vpravo).



Obr. 20. Rentgenový snímek vzorové součástky.



Obr. 21. Rentgenový snímek nepůvodní součástky s chybějícím propojením čipu s vnějším vývodem č. 9.

Vyhodnocovací přístroje založené na analogové příznakové analýze mají širší uplatnění i mimo specializované laboratoře zaměřené na posuzování původnosti polovodičových součástek. Používá je i řada firem vyrábějících sestavy elektronických modulů pro vstupní testy dodávek součástek od alternativních dodavatelů. Výhodou je cena na úrovni obvyklých měřicích přístrojů pro výrobní opravárenská pracoviště a snadná obsluha v automatickém režimu. Přípravu testů pro výrobu a vstupní kontrolu může předem zajišťovat vývojové oddělení již v době návrhu daného produktu.

Další perspektiva prevence průniku nepůvodních součástek v našich krajích

Zdokonalování prevence průniků nepůvodních elektronických součástek do výrobních sestav je závislé jak na rozvoji detekčních metod, tak také na informovanosti firem o této problematice a o možných důsledcích nedokonalé prevence nebo dobrovolného podléhání mámení nízkých cen či možnosti okamžitého řešení dodávky chybějících součástek z neověřeného zdroje. Rozvoj detekčních metod je náplní našeho výzkumného projektu a spočívá v tvořivém rozvinutí možností využití přístrojů, které máme dnes k dispozici i pro jiné aplikace a v rámci vstřícné spolupráce mezi ústavu. Takto bychom mohli ověřit a rozvinout nápady, jak využít určitého fyzikálního principu ke zjištění rozdílu v určitých znacích původních a nepůvodních elektronických součástek. V případě možnosti rozšíření stávajícího vybavení našich laboratoří bude naše úsilí soustředěno s největší pravděpodobností na získání vhodné varianty ultrazvukového rastrovacího mikroskopu.

Poděkování

Práce byla podpořena MŠMT v rámci výzkumného projektu NPU LO1303 (MSMT-7778/2014), CEBIA-Tech No. CZ.1.05/2.1.00/03.0089 a LO1212 spolu s projektem Evropské komise ALISI No. CZ.1.05/2.1.00/01.0017.

Literatura

- [1] Crawford, M. et al.: Defense Industrial Base Assessment – Counterfeit Electronics, Report of U.S. Department of Commerce, Bureau of Industry and Security, Office of Technology Evaluation, January 2010.
- [2] Zulueta, P.: G-19 Counterfeit Electronic Components Committee – Standards Development Progress, CQSDI, NASA QLF, SAE International, March 2008, <http://www.docstoc.com/docs/44086192/G-19-Counterfeit-Electronic-Components-Committee-Standards>
- [3] Hammond, R.: Detection of Counterfeit Electronic Components, American Electronic Resource, Inc., 2010, <http://www.aeri.com/detection-of-counterfeit.asp>

UMĚLÁ INTELIGENCE ANEB CO UŽ NENÍ SCI-FI

Zuzana Komínková Oplatková

Ústav informatiky a umělé inteligence, Fakulta aplikované informatiky,
Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín

oplatkova@fai.utb.cz

Abstrakt:

Do oblasti umělé inteligence patří mezi jinými také metody výpočetní inteligence, např. umělé neuronové sítě, evoluční optimalizační výpočetní techniky a také jejich nadstavba evoluční symbolická regrese. Posledně jmenovaná je metodou, která byla využita pro syntézu elektronických logických obvodů - problém sudé parity a problém světelné signalizace. V obou případech byla využita pravdivostní tabulka, podle které se určovala výsledná kvalita nalezeného obvodu. Chování samozřejmě odpovídalo 100% chování požadovanému. Jako technika evoluční symbolické regrese bylo použito analytické programování ve variantě basic a jako nutný evoluční optimalizační algoritmus byly porovnány genetické algoritmy, diferenciální evoluce a samo-organizující se migrační algoritmus.

1. Úvod

Umělá inteligence nás v současné době obklopuje ve všech oblastech lidské činnosti. Často převládá názor, že pojem umělá inteligence se rovná inteligentní robot nebo mechanismus, systém, který zvládá odpovídat na všetečné otázky tak, že máme pocit, že jednáme s dalším člověkem. Nebo reagovat či provádět nejrůznější činnosti stejně, jako to dělají lidé. Tedy nerozeznáme, že naše protistrana je umělý systém. Spousta takových systémů se objevuje v nejrůznějších sci-fi filmech či seriálech. Některé z nich jsou pořád ještě hudbou budoucnosti, některé už jsou relativně reálné - např. autonomní řídicí systémy, bezpilotní letouny či auta, nastavování systémů v autě či budovách inteligentními algoritmy na bázi "učení se" od uživatelů apod.

Pravdou je, že do této oblasti spadá mnoho různých metod a výpočetních technik, které se umí nějakým způsobem adaptovat na předkládaná data. Umí je "pochopit", zpracovat a vytvořit model, který lze pak s úspěchem používat pro nejrůznější užitečné účely.

Mezi metody umělé inteligence a její podoblasti soft computingu patří i evoluční symbolická regrese [1] - [13]. Je to proces, který lze přirovnat k činnosti, kdy se z malých stavebních kamenů vystaví složitější struktura, která má popisovat požadované chování systému. Například aproximovat sadu naměřených dat a určit funkční závislost mezi nimi, či nalézt vhodnou trajektorii robota, nebo navrhnout vhodný design logických obvodů a lze uvést spousta dalších aplikací, pro které je tento princip návrhu vhodný.

V článku je evoluční symbolická regrese využita k syntéze elektronických logických obvodů. Jednak v tzv. problému sudé parity, kdy v pravdivostní tabulce má sudý počet vstupů rovných hodnotě True výstupní hodnotu také True. Druhou popsanou úlohou je problém světelné signalizace - např. semafor a případné zvednutí závor.

Nejprve jsou popsány evoluční algoritmy obecně a krátce představeny jednotlivé využití algoritmy - genetické algoritmy [14], [15], diferenciální evoluce a samo-organizující se migrační algoritmus. Další sekce se věnuje nadstavbě evolučních optimalizačních technik - symbolické regresi a analytickému programování. Následně článek pokračuje nástiněm problému syntézy logických obvodů a je uzavřen diskusí o výsledcích.

2. Evoluční výpočetní techniky

Evoluční algoritmy přísluší do třídy stochastických prohledávacích algoritmů a pracují s náhodnými změnami navrhovaných řešení. Pokud jsou nová řešení výhodnější, nahrazují řešení předchozí. Kvalita řešení je stanovena hodnotou účelové funkce. Účelová funkce (cost function, fitness - pozn. někdy lze termíny účelová funkce a fitness zaměnit) je číselným vyjádřením, kde nejlepší řešení se nalézá v globálním extrému funkce (minimu nebo maximu). Důležitým rysem evolučních algoritmů je jejich prohledávací strategie, která je založena na populacích. Populace, jedinec, generace / migrace, evoluce, mutace či křížení jsou termíny převzaté z přírody.

Jedinec je jedno konkrétní řešení dané účelové funkce. Je to tedy vektor argumentů dané účelové funkce. Populace je sada jedinců. Prohledávání na dané fitness probíhá v cyklech, kterým se většinou říká generace. Odpovídá to algoritmům, které si vyměňují genetické informace - kříží a mutují argumenty. Některé algoritmy jsou ale více zaměřené na popis chování hejna ryb, ptáků či jiných živých tvorů. U takových algoritmů pak spíše používáme parametr migrace.

V rámci generací pak pozorujeme evoluci. Přežívají jen nejlepší jedinci. Tedy jedinec s nějakou sadou argumentů má svou kvalitu - hodnotu účelové funkce. Hledáme-li minimum, pak jedinci s nižší hodnotou účelové funkce mají prioritu a přežívají a rodiče s horší hodnotou (vyšší) jsou eliminováni. Dle komplikovanosti účelové funkce a počtu argumentů je pak třeba volit vhodné nastavení počtu jedinců i počtu generací, aby se evoluční algoritmus mohl vyvíjet správně a měl dostatek času nalézt globální extrém.

Optimalizační algoritmy nacházejí své uplatnění v mnoha průmyslových aplikacích - plánování výroby, hledání optimálních tvarů křidel letadel, plánování optimální trasy, vhodná nastavení regulátorů pro řízení a spousta dalších zajímavých příkladů. V rámci představení možností využití umělé inteligence pro návrh logických obvodů jsou evoluční algoritmy využity v evoluční symbolické regresi pro optimalizaci vhodného výsledného tvaru funkce ("tvaru" logického obvodu a použitých prvků).

Mezi evoluční algoritmy patří zcela jistě první a velmi rozšířené genetické algoritmy [14], [15], dále např. diferenciální evoluce [16], [17] a samo-organizující se migrační algoritmus [11], [12], [18], které byly použity spolu s analytickým programováním [12], [13] pro syntézu logických obvodů.

2.1. Genetické algoritmy

Genetické algoritmy (GA) [14], [15] byly vyvinuty a představeny J. H. Hollandem v roce 1975. Jedinci v GA využívají binární reprezentace. Dále se v problematice genetických algoritmů setkáváme s následujícími pojmy chromozóm, gen, genotyp, fenotyp, případně alela. *Chromozóm* je část DNA, která je stočená do záhybů. *Gen* jsou jednotlivé části chromozómu. Kompletní genetický popis organismu je tzv. *genotyp*. V souvislosti s genotypem se ještě uvádí i tzv. *fenotyp*, který je v podstatě fyzickým popisem genotypu (např. jestliže je v binárním pojetí genotyp „0101“, pak fenotyp je jeho dekadická hodnota „5“). Geny mohou nabývat pouze jistých hodnot, jejichž obecné označení je *alela*.

Genetické algoritmy pracují v počítačových aplikacích následujícím způsobem [14], [15]: Náhodně je vygenerována množina chromozómů, ze které jsou vybírány dvojice (rodiče) na základě toho, jak dobře splňují kriteriální (účelovou) funkci. Potomci jsou tvořeni křížením svých rodičů, jež následně nahrazují. Stejně jako v přírodě, tak i v technických aplikacích hrají důležitou roli náhodné změny – *mutace*. To se v technice obvykle řeší pomocí generátoru náhodných čísel.

U genetických algoritmů se rozlišuje účelová funkce a fitness. *Účelová funkce* – je to funkce, kterou chceme minimalizovat. *Vhodnost (fitness)* je číslo, které nám udává vhodnost nového potomka z hlediska kriteriální funkce (je to v podstatě matematický popis životního prostředí daného jedince), obvykle to bývá převrácená hodnota účelové funkce. Čím je toto číslo větší, tím je i daný jedinec vhodnější pro dané okolní podmínky.

Základní cyklus, který pak běží v generacích lze zapsat následovně:

1. Navržení genetické struktury.
2. Inicializace.
3. REPEAT
 - (a) Ohodnocení každého jedince v populaci.
 - (b) Konverze genotypu na fenotyp.
 - (c) Ohodnocení objektivní funkce.
 - (d) Konverze objektivní funkce na vhodnost (fitness).
 - (e) Konverze vhodnosti na selekci rodičů.
 - (f) Výběr rodičů.
 - (g) Aplikace operátoru *křížení* na vybrané rodiče a vytvoření potomků, tvořících další generaci rodičů.
 - (h) Aplikace operátoru *mutace*.
4. UNTIL není splněna podmínka ukončení.

2.2. Diferenciální evoluce

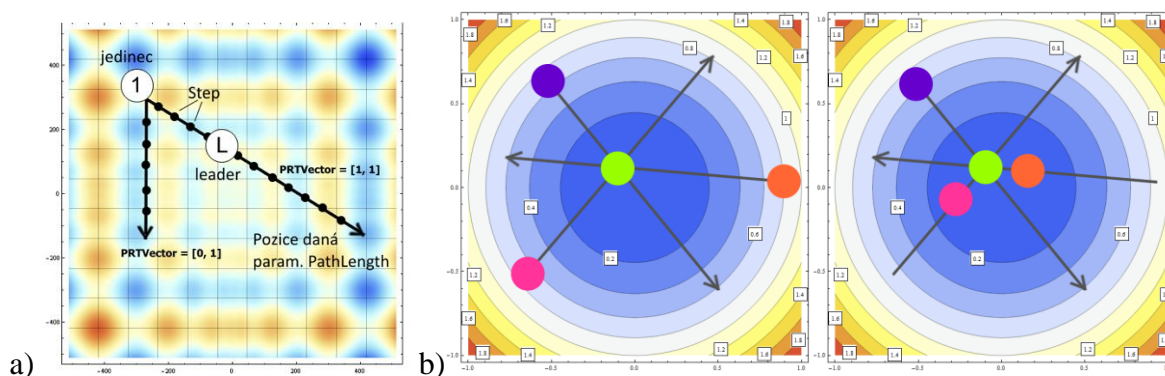
V roce 1995 vyvinuli Ken Price a Rainer Storm algoritmus diferenciální evoluce (DE) [16], [17]. Je to populační metoda, která má jedince kódované v reálných číslech. DE je poměrně robustní, rychlý a efektivní algoritmus se schopností nalézat globální extrémy. Nevyžaduje, aby účelová funkce byla derivovatelná a funguje dobře i na zašuměných a časově závislých účelových funkcích.

Na rozdíl od genetických algoritmů, potřebuje DE 4 rodiče ke vzniku potomka. Základní cyklus generace probíhá následovně (stejně jako u jiných evolučních algoritmů - variant mutací či křížení je více): Pro každého jedince $\bar{x}_{i,G}$ v aktuální generaci G vygeneruje DE nového trial jedince $\bar{x}'_{i,G}$ sečtením váhovaného rozdílu mezi dvěma náhodně vybranými jedinci $\bar{x}_{r1,G}$ a $\bar{x}_{r2,G}$ a třetího náhodně vybraného jedince $\bar{x}_{r3,G}$. Argumenty výsledného jedince $\bar{x}'_{i,G}$ jsou pak kříženy s argumenty původního jedince $\bar{x}_{i,G}$. Hodnota fitness výsledného vektoru $\bar{u}_{i,G+1}$ je pak srovnána s hodnotou fitness původního jedince $\bar{x}_{i,G}$. Pokud je fitness $\bar{u}_{i,G+1}$ větší než fitness $\bar{x}_{i,G}$, pak $\bar{x}_{i,G}$ je nahrazen $\bar{u}_{i,G+1}$; jinak původní jedinec $\bar{x}_{i,G}$ zůstává v populaci jako $\bar{x}_{i,G+1}$.

2.3. Samo-organizující se migrační algoritmus (SOMA)

Činnost algoritmu SOMA je založena na vektorových operacích podobně jako jiné populační algoritmy typu genetické algoritmy, diferenciální evoluce a podobně. Algoritmus vytváří nové populace migračním operátorem a speciálním operátorem, který může zastupovat formu mutace. Můžeme jej tedy řadit k evolučním algoritmům. SOMA algoritmus patří také do skupiny memetických či hejnových algoritmů. Potomci se nevytvářejí křížením jako u jiných evolučních algoritmů, ale spíše je filozofie algoritmu založena na pohybu inteligentních jedinců, tj. migraci jedinců. Tito jedinci spolupracují při řešení společného problému. Jedinci prohledávají prostor možných řešení podobně, jako jejich biologické protějšky prohledávají krajinu a hledají např. potravu. Evoluční cyklus se tedy nenazývá generace, ale *migrace*. Nejedná se o vývoj nových jedinců, spíše o přesun původních jedinců na nové pozice. Příklady takového chování, jež byly inspirací pro tento algoritmus, lze nalézt i v reálném světě. Jsou to např. mravenci, včely, predátoři ve smečce hledající potravu apod. Vlastnost samo-organizace u algoritmu SOMA plyne z faktu, že se jedinci ovlivňují navzájem během hledání lepšího řešení, což mnohdy vede k tomu, že v prostoru možných řešení vznikají skupiny jedinců, které se během putování přes prohledávaný prostor rozpadají či spojují. Jinými slovy si skupina jedinců neboli populace sama organizuje vzájemný pohyb jedinců – proto tedy samo-organizace [11], [12], [18].

Základní cyklus jedné migrace varianty AllToOne algoritmu SOMA lze schematicky znázornit na obr. 1.



Obr. 1. - Schematicky činnost algoritmu SOMA

Každého jedince ohodnotíme účelovou funkcí a určíme mezi jedinci *Leadera* (obr. 1 a). Následně dochází k migraci ostatních jedinců směrem k Leaderovi po zvolených krocích (parametr *Step*). Znovu dochází k ohodnocení jedinců účelovou funkcí, a pokud se u některých jedinců změnila hodnota k lepšímu – jedinec si ji zapamatuje. Po skončení migračního kola se všichni jedinci posunou na novou, nejlépe ohodnocenou pozici (obr. 1 b). *Leader* zůstává na místě. Než daný jedinec započne svou cestu směrem k *Leaderovi*, je vygenerován prázdný *PRTVector* o dimenzi = D včetně vygenerované sekvence náhodných čísel z intervalu $\langle 0,1 \rangle$ pro každý optimalizovaný parametr. Tato náhodná čísla jsou porovnána s parametrem *PRT*. Jestliže je n -té vygenerované číslo větší nežli *PRT* parametr, pak je n -tý parametr *PRTVectoru* nastaven na 0 a v opačném případě na 1. Parametry jedince, které jsou takto nastaveny na 0, se nepřepočítávají (tj. jsou zmraženy obr. 1 a)) - snižuje se počet stupňů volnosti pohybu jedince. Tento proces nahrazuje operátor mutace, jež obvykle u evolučních algoritmů probíhá. Díky tomu se rapidně zvyšuje robustnost SOMA algoritmu ve smyslu nalezení globálního extrému.

3. Symbolická regrese

Pokud hovoříme o symbolické regresi v souvislosti s evolučními algoritmy, existuje v současnosti několik nástrojů. Nejznámější je určitě genetické programování [1], [2] a gramatická evoluce [3].

Další přístupy založené buď na evolučních nebo hybridních technikách používajících symbolickou regresi byly představeny např. Johnsonem [4] pracujícím s technikou umělého imunologického systému. Salustowicz představil systém generování programů z adaptivní distribuce pravděpodobnosti všech možných řešení v pravděpodobnostní inkrementální evoluci programů (Probabilistic Incremental Program Evolution – PIPE) [5]. Gramatické evoluci předcházeli GADS (Genetic Algorithm for Deriving Software), vylepšené genetické programování, který řeší přístup gramatiky k tvorbě programů [6], [7]. Přístupy, které se liší v reprezentaci a gramatice jsou popsány v programování genových výrazů (Gene Expression Programming) [8], multivýrazovém programování (Multiexpression Programming) [9], metamodelování pro symbolickou regresi a Pareto simulovaném žíhání [10]. V neposlední řadě se mezi metody pro symbolickou regresi řadí také analytické programování [11] - [13].

4. Analytické programování (AP)

K pochopení AP je nutné se seznámit s principem ošetření diskrétního parametru jedince (Discrete Set Handling – DSH), na němž je celé AP založeno. Jak již z názvu vyplývá, jedná se o případ, kdy jednotlivé parametry jedince mohou nabývat pouze konečného počtu diskrétních hodnot. Jedinec evolučního algoritmu, který analytickému programování pomáhá nalézt nejlepší řešení, obsahuje celočíselné indexy do množiny diskrétních prvků. Evolučního procesu se tedy účastní indexy, ale hodnocení kvality jedince původní diskrétní hodnoty, které se dosadí na příslušná místa v účelové funkci [12], [13].

Z pohledu principu evolučních algoritmů je tedy vhodnější konstatovat, že AP není samostatný evoluční algoritmus, ale spíše prostředek transformace či zobrazení z množiny základních symbolických objektů do množiny možných programů, které lze z těchto symbolických objektů zkonstruovat [12], [13].

Za symbolické objekty považujeme podobně jako v genetickém programování či gramatické evoluci, terminály, funkce, operátory apod. Všechny tyto objekty je nutné před použitím AP rozdělit do skupin resp. množin podle počtu svých argumentů. Například operátor „+“ vyžaduje dva argumenty, funkce „sin“ má jeden argument, terminál „x“ nepotřebuje žádný argument apod. Dále je nutné vytvořit množinu, ve které se nacházejí všechny objekty dílčích skupin. Pro označení jednotlivých množin objektů se v AP používá označení GFS_{xarg} (general function set – obecná funkční množina), kde x v indexu $xarg$ je číslo udávající počet argumentů u funkcí obsažených v této množině [12], [13]. Pro množinu, která obsahuje všechny objekty je použito označení GFS_{all} . Toto rozdělení funkcí do množin má svůj hlavní význam při zásahu proti generování patologických programů, tj. těch, které principiálně nemohou fungovat.

Pro řešení regrese, či symbolického integrování pomocí AP by definované množiny funkcí mohly vypadat například takto:

$$GFS_{0arg} = \{x, K\}$$

$$GFS_{1arg} = \{\cos, \sin, \exp, \log\}$$

$$GFS_{2arg} = \{+, -, *, /\}$$

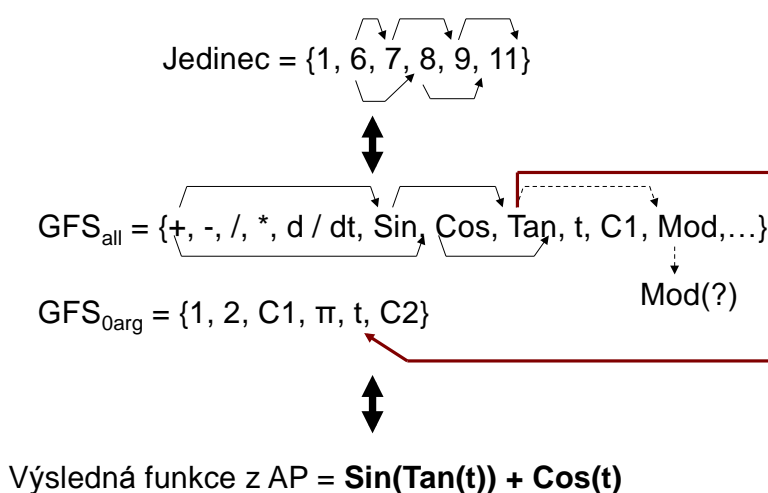
$$GFS_{all} = GFS_{2arg} \cup GFS_{1arg} \cup GFS_{0arg} = \{+, -, *, /, \cos, \sin, \exp, \log, x, K\}$$

Konstanta K je speciální konstanta v AP.

Na rozdíl od genetického programování či gramatické evoluce zde není třeba generovat různé číselné konstanty předem. Analytické programování sice potřebuje také číselné konstanty, ale ty se generují až v průběhu evoluce pomocí konstanty K , která se indexuje ještě před samotným ohodnocením účelové funkce jako K_1, K_2, \dots, K_n . Tyto konstanty jsou poté numericky odhadnuty. Pro získání numerických hodnot konstant K používáme dva typy - AP_{nf} (nf – jako numerické či nelineární fitování (prokládání) pomocí balíčku nelineárního fitování v softwaru *Mathematica* od Wolfram Research). Další možností, jak můžeme ohodnotit konstanty K , je AP_{meta} . Meta znamená metaevoluci. Pro ohodnocení konstant se používá další evoluční algoritmus. Struktura celého procesu je pak dána tímto zjednodušeným předpisem: EA_{master} >syntéza programu>indexování K >spuštění EA_{slave} >nastavení K_n , kde EA (podřízený - *slave*) „pracuje pod“ EA (nadřízený - *master*).

Úplně první verze analytického programování je AP_{basic} , která přistupuje k syntéze programů stejně jako kanonická GP, tzn. že společně s funkcemi a operátory byly vygenerovány náhodně i konstanty, které byly součástí syntézy analytických programů. Problém tohoto přístupu spočívá v tom, že velké množství vygenerovaných konstant přispívá ke zvýšení kardinality množiny všech možných kombinací a ke zpomalení nalezení optimálního řešení. Také se této varianty používá v případě, že žádné ohodnocování konstant není potřeba, např. při hledání vhodné trajektorie robota nebo návrhu logických obvodů apod. [12], [13].

Princip mapování funkce z jedince je zobrazen na obr. 2.



Obr. 2. - Princip tvorby výsledné funkce u analytického programování

V jedinci se na první pozici nachází index 1, který odpovídá v GFS_{all} operátoru **plus**. Prozatím je vygenerován základní vzorec $arg1 + arg2$. Dále je pak potřeba obsadit pozice $arg1$ a $arg2$. Následující dvě pozice v jedinci jsou indexy 6 a 7. Ty představují v GFS_{all} - 6tou funkci **Sin** a 7mou **Cos**. Vzorec se rozroste na $Sin(arg1) + Cos(arg2)$. Stále je nutné vyplnit $arg1$ funkce Sin a $arg2$ funkce Cos. Tedy využijí se operátory na pozicích 8 a 9 v GFS_{all} - 8má je funkce **Tan** a 9tá konstanta **t**. A vzorec se na jedné straně již uzavírá $Sin(Tan(arg1)) + Cos(t)$. Zbývá už jen obsadit v levé části $arg1$, část s funkcí Cos je uzavřena. V jedinci zbývá už jen jedna pozice. Tato pozice v GFS_{all} , 11tá, je funkce **Mod**, která ale potřebuje další operátory. Nicméně jedinec již nemá další možné pozice, které by se těmito operátory mohly stát. Je třeba přeskočit do GFS_{0arg} , kde 11tá pozice je konstanta **t**. A výsledný vzorec pak zobrazuje rovnice (1).

$$\mathbf{Sin(Tan(t)) + Cos(t)} \quad (1)$$

Účelová funkce u analytického programování je vždy rozdíl mezi požadovaným chováním a právě syntetizovaným výstupním programem (funkcí). Pro správný proces analytického programování je tedy třeba účelovou funkci minimalizovat. Nejlépe dosáhnout hodnoty nula, kdy se požadované chování ztotožňuje se syntetizovaným programem. K tomu se využívají již popsané evoluční algoritmy - optimalizační algoritmy pro složité a komplikované problémy, kterým symbolická regrese zcela určitě je.

5. Řešené úlohy

Úkolem je nalézt vhodný zápis logického obvodu na základě zadané pravdivostní tabulky. Je možné využít různé komponenty elektronických logických obvodů, jako je AND, NAND, OR..a samozřejmě vstupní prvky, které nabývají hodnot True (1) nebo False (0). V tomto článku jsou popsány dvě úlohy - problém sudé parity a problém světelné signalizace.

5.1. Problém sudé parity

Sudá parita využívá pravdivostní tabulku, kde sudý počet vstupních hodnot rovných True dává výstupní hodnotu také True (Tab. 1). Zde je pro ukázkou uveden příklad se třemi vstupy. Nicméně proces analytického programování lze využít i pro mnohem vyšší dimenze vstupů, které komplikují proces optimalizace.

Jako účelová funkce se zvolila Hammingova vzdálenost mezi požadovaným chováním a aktuální odezvou syntetizovaného programu.

Tabulka 1. - Ukázková pravdivostní tabulka pro problém sudé parity o počtu vstupů = 3

Input 1	Input 2	Input 3	Output
True	True	True	False
True	True	False	True
True	False	True	True
False	True	True	True
True	False	False	False
False	True	False	False
False	False	True	False

Operátory použité pro syntézu

$GFS_{2arg} = \{AND, NAND, OR, NOR\}$

$GFS_{0arg} = \{Vstup1 (Input 1 \text{ nebo } A), Vstup2 (Input2 \text{ nebo } B), Vstup3 (Input3 \text{ nebo } C)\}$

AP_{basic} - bez ohodnocení konstant - konstanty zde žádné nejsou

Ukázka výsledné funkce je vyjádřena vztahem (2).

$$\begin{aligned} & ((C \bar{V} A) \vee B \vee (\neg C \wedge B \wedge A) \vee (\neg B \wedge C \wedge A) \vee (\neg A \wedge C \wedge B) \vee \\ & \quad (((\neg C \wedge B \wedge A) \vee (\neg B \wedge C \wedge A) \vee (\neg A \wedge C \wedge B)) \bar{V} A) \bar{\wedge} (C \vee B))) \wedge \\ & \quad (((C \vee B) \bar{V} (A \vee C)) \vee ((C \vee A) \wedge ((\neg C \wedge B \wedge A) \vee (\neg B \wedge C \wedge A) \vee (\neg A \wedge C \wedge B)))) \end{aligned} \quad (2)$$

Délka vlastního programu, případně problémy typu $A \text{ AND } A$, jsou samozřejmě problematické při návrhu logických obvodů. Určitě by bylo možné použít penalizací účelové funkce s ohledem na kvalitu struktury výsledného programu. Dané výsledky nicméně byly prováděny v rámci komparativních testů analytického programování a genetického programování a bylo třeba dodržet stejnou formu účelové funkce.

Experimenty byl 50x zopakovány pro genetické algoritmy (GA), diferenciální evoluci (DE) i samo-organizující se migrační algoritmus (SOMA). V každé simulaci bylo nalezeno řešení - nicméně v různých opakováních s různým počtem ohodnocení účelové funkce a různou délkou vlastního syntetizovaného programu. V následujících tabulkách (Tab.2) jsou zvýrazněny počty ohodnocení účelové funkce (CFE), které do jakési míry vyjadřují porovnatelnou "časovou" náročnost algoritmu. Také je zde zobrazena délka syntetizovaného programu - tedy počet jednotlivých komponent jako je Input A, Nand, Or... atd.

Tabulka 2. - Počty ohodnocení účelové funkce (CFE) a délka programu pro jednotlivé algoritmy

0 e"ení problému sudé-3-parity pomocí GA.

	CFE	Délka programu
Minimum	2923	220
Pr) m' r	35386	2910
Maximum	130069	10157

0 e"ení problému sudé-3-parity pomocí SOMA.

	CFE	Délka programu
Minimum	4256	508
Pr) m' r	23861	2950
Maximum	92542	10770

0 e"ení problému sudé-3-parity pomocí DE.

	CFE	Délka programu
Minimum	1371	58
Pr) m' r	9456	126
Maximum	20789	186

5.2. Světelná signalizace

Problém světelné signalizace je v podstatě obyčejný semafor - červená, oranžová, zelená, kdy na oranžovou spolu se zelenou nebo zelenou lze vyrazit kupředu (nebo otevřít závoru apod.). Pravdivostní tabulka pro světelnou signalizaci má předpis dle (Tab. 3). Ukázka byla zpracována v rámci diplomové práce Romana Strakoše [19].

Tabulka 3. - Pravdivostní tabulka pro problém světelné signalizace

Vstup 1	Vstup 2	Vstup 3	Výstup
False	False	False	False
False	False	True	True
False	True	False	False
False	True	True	True
True	False	False	False
True	False	True	False
True	True	False	False

Použité operátory jsou obdobné jako u předchozí úlohy sudé parity:

$$\text{GFS}_{2\text{arg}} = \{\text{AND}, \text{NAND}, \text{OR}, \text{NOR}\}$$

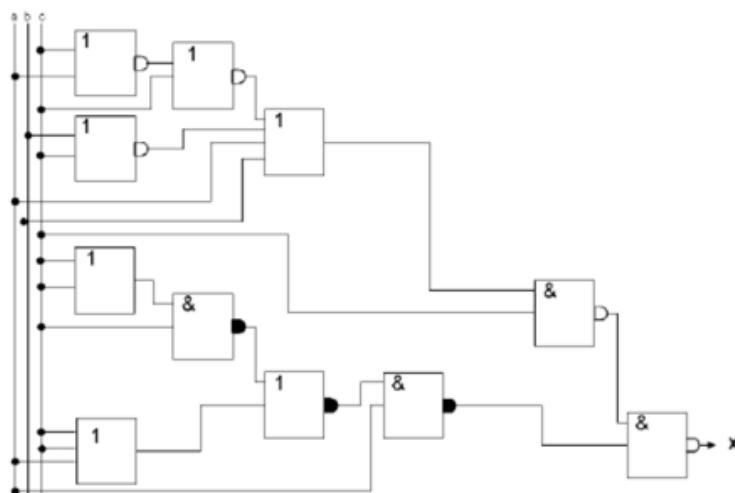
$$\text{GFS}_{0\text{arg}} = \{\text{Vstup1}, \text{Vstup2}, \text{Vstup3}\}$$

AP_{basic} - bez ohodnocení konstant, žádné nejsou

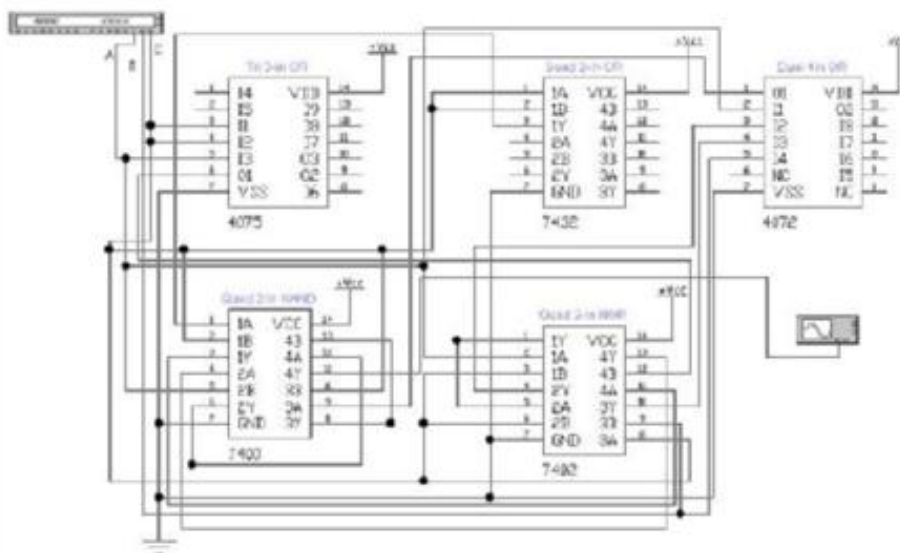
Z principu evolučních výpočetních technik, i tato úloha má více řešení. Ukázky syntetizovaných řešení jsou vyjádřeny vztahy (3) a (4). Tato řešení pak byla aplikována na vytvoření schématu logického obvodu a následně i implementována pomocí integrovaných obvodů do funkčního modulu (Obr. 3 - Obr. 6). V Tab. 4. jsou pak znázorněny minima, maxima a průměry pro ohodnocení účelové funkce a délky syntetizovaných programů.

$$(C \bar{A} (((C \bar{D} A) \bar{D} C) \vee (B \bar{D} C) \vee A \vee B)) \bar{A} (A \bar{A} ((C \vee C \vee A) \bar{D} ((C \vee C) \bar{A} C))) \quad (3)$$

$$(A \vee (B \wedge (((A \bar{A} C) \vee (A \wedge C)) \bar{A} C) \bar{D} (((C \vee B) \bar{D} (A \vee B)) \wedge (A \vee B)))) \wedge C \bar{A} C \quad (4)$$

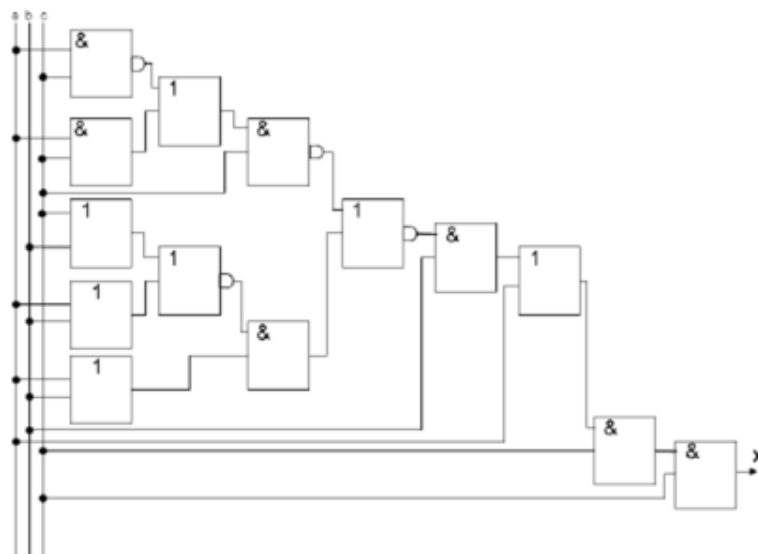


Obr. 3. - Schéma obvodu pro syntetizovaný program (3)

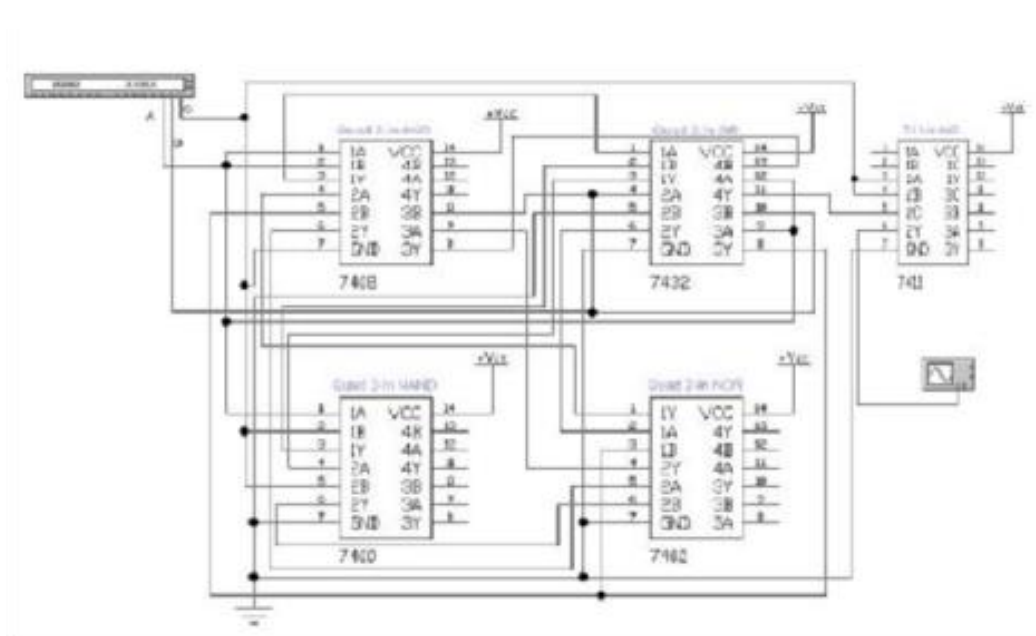


Obr. 4. - Funkční modul s integrovanými obvody pro syntetizovaný program (3).

Použité integrované obvody: MC 4075 1x – tři vstupů OR, MC 7400 1x – čtyř vstupů NAND, MC 7432 1x – čtyř vstupů OR, MC 7402 1x – čtyř vstupů NOR, MC 4072 1x – osmi vstupů OR



Obr. 5. - Schéma obvodu pro syntetizovaný program (4)



Obr. 6. - Funkční modul s integrovanými obvody pro syntetizovaný program (4).

Použité integrované obvody: MC 7408 1x – čtyř vstupý AND, MC 7400 1x – čtyř vstupý NAND, MC 7432 1x – čtyř vstupý OR, MC 7402 1x – čtyř vstupý NOR, MC 7411 1x – tří vstupý AND

Tabulka 4. - Počty ohodnocení účelové funkce (CFE) a délka programu

	CFE	Délka programu
MIN	636.2	28.84
MAX	3	5
Průměr	4154	82

6. Závěrem

Článek se zabývá využitím oblasti umělé inteligence, metod soft computingu a výpočetní inteligence, pro návrh elektronických logických obvodů. Jedná se především o využití evoluční symbolické regrese spolu s evolučními algoritmy. Článek představuje použití analytického programování pro syntézu logického obvodu pro problematiku sudé parity a pro světelnou signalizaci.

Výsledky ukazují, že tento typ nekonvenčního přístupu lze s úspěchem použít. Jen je třeba dbát na definici účelové funkce a případné penalizace, pokud nejsme spokojeni s tvarem syntetizovaného programu.

Článek prezentoval metody, které jsou jednoduché pro pochopení principu i případnou aplikaci a implementaci v nejrůznějších systémech. I tyto popsané metody výpočetní inteligence jsou v hojné míře používány i v aplikacích, které se zdají být ještě sci-fi. Nicméně v mnoha případech už nejsou. Ať už se jedná o zpracování přirozeného jazyka, systémy v automobilech bez řidiče, které musí vnímat a "chápat, rozumět" svému okolí, rozpoznávat jednotlivé objekty, sledovat silnici, rozpoznávat značky, atd., případně řízení lidského komfortu, ať už teplotního, čerstvost vzduchu, světelného v různých objektech - zasedací místnosti, kanceláři, kabině aut nebo zpracování fenoménu zvaného Big Data - hledat souvislosti, chápat je a aplikovat na nová data. Potenciál umělé inteligence je zcela určitě obrovský a její využívání zcela určitě má své místo a mít bude i v budoucnu v nejrůznějších sférách lidského konání.

7. Poděkování

Tato práce byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky spolu s projektem Národního programu udržitelnosti č. LO1303 (MSMT-7778/2014) a také projektem Evropského fondu pro regionální rozvoj CEBIA-Tech č. CZ.1.05/2.1.00/03.0089, dále byl podpořen grantem Grantové agentury České republiky - GACR P103/15/06700S.

8. Reference

- [1] Koza J. R., Genetic Programming, MIT Press, 1998, ISBN 0-262-11189-6
- [2] Koza J. R. et al., Genetic Programming III; Darwinian Invention and problem Solving, Morgan Kaufmann Publisher, 1999, ISBN 1-55860-543-6
- [3] O'Neill M., Ryan C., Grammatical Evolution. Evolutionary Automatic Programming in an Arbitrary Language, Kluwer Academic Publishers, 2003, ISBN 1402074441
- [4] Johnson C. G., Artificial Immune System Programming for Symbolic Regression, Lecture notes in Computer Sciences series, Springer, Volume 2610/2003, 2003, ISSN 0302-9743
- [5] Salustowicz R. P., Schmidhuber J., Probabilistic Incremental Program Evolution, Evolutionary Computation, vol. 5, nr. 2, 1997, pages 123 – 141, MIT Press, ISSN 1063-6560
- [6] Paterson N., Livesey M., Distinguishing genotype and phenotype in genetic programming, In Koza, Goldberg, Fogel & Riolo, eds. Late Breaking Papers at GP 1996, MIT Press, 1996, ISBN 0-18-201-031-7
- [7] Paterson N., Genetic Programming with context sensitive grammars, doctoral thesis, University of St. Andrews, 2003
- [8] Ferreira C., Gene Expression Programming: Mathematical Modeling by an Artificial Intelligence, Springer, 2006, ISBN: 3540327967

- [9] Oltean M., Grosan C., A Comparison of Several Linear Genetic Programming Techniques, Complex Systems, 2003
- [10] Stinstra E., Rennen G., Teeuwen G., Meta-modelling by symbolic regression and Pareto Simulated Annealing, Tilburg University, Netherlands, nr. 2006-15, ISSN 0924-7815
- [11] Zelinka I., Umělá inteligence v problémech globální optimalizace, BEN, Praha, 2002, ISBN 80-7300-069-5
- [12] Zelinka, I., Oplatková, Z., Ošmera, P., Šeda, M., Včelař, F. Evoluční výpočetní techniky - principy a aplikace. BEN - technická literatura, Praha, 2008, ISBN 80-7300-218-3.
- [13] Zelinka, I., Davendra, D., Šenkeřík, R., Jašek, R., Oplatková, Z.: Analytical Programming - a Novel Approach for Evolutionary Synthesis of Symbolic Structures. In Evolutionary Algorithms. Rijeka : InTech, 2011, s. 149-176. ISBN 978-953-307-171-8
- [14] Back T., Fogel D. B., Michalewicz Z., Handbook of evolutionary algorithms, Oxford University Press, 1997, ISBN 0750303921
- [15] Kvasnička, V. - Pospíchal, J. - Tiňo, P. Evolučné algoritmy. STU Bratislava 2000.
- [16] Price K., Storn R. M., Lampinen J.: Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization, Natural Computing Series, Springer, 1 edition, ISBN 978-3-540-31306-9 (2005)
- [17] Price K. and Storn, R.: Differential evolution homepage, <http://www.icsi.berkeley.edu/~storn/code.html> (2012) [Online; Accessed 29/02/2012]
- [18] Zelinka I., „SOMA – Self Organizing Migrating Algorithm“, In: Babu B.V., Onwubolu G. (eds), New Optimization Techniques in Engineering, Springer-Verlag, 2004, ISBN 3-540-20167X
- [19] Strakoš R.: Evoluční návrh elektronických obvodů, diplomová práce, UTB Zlín, 2005

TRENDY V INSTALACI FOTOVOLTAICKÝCH PANELŮ

Jiří Vávra

Katedra elektrotechniky, Univerzita obrany, Kounicova 65, 662 10 Brno

jiri.vavra@unob.cz

Abstrakt

Článek popisuje aktuální trendy v instalaci nových fotovoltaických systémů v české republice v roce 2016, kdy již není aktuální finanční podpora formou zelených bonusů nebo přímých výkupů pro nové instalace. Článek popisuje aspekty rozhodování před instalací a možnosti jejího financování. Článek naopak nepopisuje komponenty systému, ani základní principy fungování fotovoltaiky, protože tato problematika je již běžně známa a je mnohokrát popisována v různých populárních i vědeckých člancích. Článek se z pochopitelných důvodů nezajímá ani o stávající fotovoltaické elektrárny. Článek neslouží jako návod na projektování ani na instalaci fotovoltaického zdroje, ale především jako manuál k rozhodnutí se o investici do této technologie.

Úvod

Volba instalace fotovoltaických panelů je vždy doprovázena finanční bilancí a rozhodování o tom, zda se případná instalace vyplatí a zda má reálnou návratnost investovaných prostředků. Je tedy důležité v rozhodnutí zohlednit veškeré aspekty, které by ho mohly jakýmkoliv způsobem ovlivnit. Zásadní změna, která se nyní nejvíce projevuje, je fakt, že od konce roku 2013 neplatí pro nové instalace podpora formou tzv. zelených bonusů nebo přímých výkupů. Jednalo se o dotování vyrobené elektrické energie fotovoltaickým zdrojem bez ohledu na jeho spotřebu nebo proudění do sítě. Nelze však říci, že fotovoltaické zdroje již nejsou podporovány. Dotace na nové instalace fungují, jen už nejsou tak „bezhlavé“, naopak je pozornost soustředěna na co největší využití vyrobené energie.

Bilance

At' se na fotovoltaický systém díváme jakkoliv, jedná se především o investici, na kterou se lze dívat dvěma úhly pohledu. Ten první je investice za účelem zisku, tedy podnik, který by se jednak měl zaplatit, ale samozřejmě co nejvíce finančně zhodnotit. Tedy se jedná o zhodnocení finančních prostředků. Druhý úhel pohledu je investice za účelem uspoření nákladů na provoz daného odběrného místa, ve kterém je fotovoltaický systém instalován. Tím by mělo samozřejmě dojít k navrácení investovaných prostředků a nejen to, ale také i k případnému zhodnocení ve formě dalších úspor. Popisovaný první úhel pohledu bylo možné využít právě do konce roku 2013, protože je to přímo spojeno s dotováním vyráběné elektřiny. Ten druhý úhel pohledu je nyní aktuální, protože se týká dotace právě na výstavbu nových fotovoltaických systémů, přičemž vyráběná energie již není následně nijak dotována. Nutno dodat, že své speciální místo zaujímá fotovoltaický systém v místě, kde není dostupná distribuční síť, nebo případná potřeba nezávislosti na distribuční síti, at' už jde o zálohu, nebo o potřebný náhradní zdroj. V těchto případech je pochopitelně na „návratnost“ investice nahlíženo poněkud z jiné stránky, protože ona „potřeba“ je těžko finančně vyčíslitelná a tedy ji lze jen stěží zahrnout do finančních bilancí.

Jedním z nejvíce rozhodujících faktorů je finanční stránka projektu, do které je nutné zahrnout především úsporu ve formě spotřeby především vlastní elektřiny, místo nákupu elektřiny ze sítě. K tomu je nutné znát roční vyúčtování za elektřinu v daném odběrném místě. Jak je všeobecně známo, lokální distributor elektrické energie je ze zákona povinen vykupovat elektrickou energii z ekologických zdrojů, přičemž minimální výše ceny za tuto elektřinu je stanovena cenovým rozhodnutím energetického regulačního úřadu. Ve skutečnosti se pohybuje od 0,3 do cca 0,7 Kč/kWh podle daného obchodníka s elektřinou. Tato praxe naznačuje, že z pohledu celkové investice se jedná o velmi zanedbatelnou částku a tudíž ji lze z rozhodování vyloučit. Lze na ni pohlížet jako na určitý bonus, ale na celkovou ekonomiku nemá téměř žádný vliv. Jak již bylo naznačeno, nelze uvažovat již ani zelený bonus ani přímý výkup. Viz výše. Co je naopak velmi důležité a dnes zásadní jsou dotace na instalaci, tedy jednorázový finanční příspěvek na pořízení fotovoltaického systému.

Aktuální pozornost v oblasti výstavby nových zdrojů je orientován do oblasti maximálního využití vyrobené energie – jen tak lze totiž dosáhnout akceptovatelné návratnosti investovaných finančních prostředků.

Před vlastním rozhodnutím o instalaci fotovoltaického systému je velmi vhodné u lokálního distributora vyžádat smlouvu o připojení zdroje k distribuční síti. Žádost o tuto smlouvu obsahuje identifikaci přípojného místa, předběžný návrh technologie a maximální předpokládaný výkon uvažovaného systému. Přílohou se dokládá situační plán a jednopólové schéma. Distributor připraví návrh smlouvy, kde je uveden maximální instalovaný výkon systému, který nelze překročit – lze jej však plně nevyužít, tedy snížit (např. na základě energetických rozborů, projektové dokumentace apod.). Je však možné, že dovolený připojitelný výkon distributorem je 0 kWp, tzn., že v daném místě není k dispozici „dostatečná kapacita sítě“ a nelze do sítě v tomto místě dodávat výkon. Ve skutečnosti je kapacita pro malé zdroje bezesporu dostatečná, ale jelikož hrozí přetoky energií do VN, tedy přes transformátor NN/VN, není instalace zpravidla povolena. V takovém případě jsou k dispozici dvě další cesty, první představuje instalaci fotovoltaického systému, který je oddělen od distribuční sítě a je přímo připojen k elektrickému ohřevu TUV nebo akumulární nádrže. Takový systém má nespornou výhodu v absenci střídače, tedy úspore nákladů, navíc zde nedochází k energetickým ztrátám. Druhou cestou je instalace tzv. „mikrozdroje“ (nový termín ve fotovoltaice).

Mikrozdrojem se rozumí zdroj elektrické energie a všechna související zařízení pro výrobu elektřiny, určený pro paralelní provoz s distribuční soustavou nízkého napětí se jmenovitým střídavým fázovým proudem do 16 A na fázi včetně a celkovým maximálním instalovaným výkonem do 10 kW včetně.

Pro mikrozdroje je možno využít tzv. zjednodušující proces připojení. Základní podmínky pro zjednodušené připojení mikrozdroje jsou:

- 1 Splnění požadované hodnoty impedance v místě připojení dané vyhláškou o připojení č. 16/2016 Sb. ($0,47 \Omega$ pro zdroje do 16 A; $0,75 \Omega$ pro zdroje do 10 A).
- 2 Technické řešení mikrozdroje, které zamezuje dodávce elektřiny do distribuční soustavy v místě připojení, s výjimkou krátkodobých přetoků elektřiny do distribuční soustavy, které slouží pro reakci omezujícího zařízení, ale které nezvýší hodnotu napětí v místě připojení.

Vývoj SW střídačů, které umí kontrolovat toky energií patou přípojného místa a řídit svůj výkon je nyní velmi aktuální. Nepovolená dodávka energie do sítě je totiž pokutovaná podle aktuálně platného cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu. Pro letošní rok lze v cenovém rozhodnutí č. 7/2015 nalézt bod (1.10.):

„Pevná cena za překročení rezervovaného výkonu podle vyhlášky o podmínkách připojení k elektrizační soustavě pro místo připojení výrobce elektřiny, sjednaného ve smlouvě o připojení je rovna za každý kW překročení 325 Kč/kW/měsíc.“

Vyhodnocení překročení rezervovaného výkonu provádí provozovatel přenosové soustavy měsíčně a je vztaženo k nejvyšší hodnotě překročení sjednaného rezervovaného výkonu.

Často kladenou otázkou bývá potřeba stavebního povolení. V případě systému v rozsahu definovaným mikrozdrojem bývají podmínky pro instalaci zjednodušeny a to respektují i stavební úřady. Tedy ve většině případů instalace fotovoltaického systému na střechu budovy nevyžaduje žádné povinnosti ke stavebnímu úřadu. Výjimkou jsou instalace v místech, jejichž povaha vyžaduje komunikaci se stavebním úřadem (ohlášení stavby, úřední rozhodnutí a stavební řízení). Jedná se především o historické zóny měst, národní parky, chráněné krajinné oblasti apod. Od 1. 1. 2013 je podle novely stavebního zákona č. 350/2012 Sb. § 103 odst. 1 písm. e) bod 9 stanoven limit pro volný režim staveb pro výrobu energie na instalovaný výkon do 20kW. Nad instalovaný výkon 20kWp je tedy potřeba stavební povolení.

Dotace

Je-li investor seznámen s návrhem smlouvy s distribuční společností, zná podmínky stavebního úřadu, může hledat ekonomické důvody k instalaci. Zásadním rozhodujícím faktorem v této oblasti může být možnost získání jednorázové dotace na instalaci – jak již bylo naznačeno výše. S tímto faktorem se pojí ještě nutná podmínka zapsané budovy v KN, což nebývá u zahradních domků nebo garáží, či stodol stojících vedle RD pro kterou je žádost o dotaci podávána zvykem. Je tedy nutné před podáním žádosti tuto skutečnost ověřit, případně dodatečně napravit.

Další podmínkou je volba technologie pouze ze seznamu nabídky NZU, tedy technologie s uděleným SVT kódem. To do jisté míry může následný výběr z nepřeberných druhů panelů a střídačů, případně baterií značně zjednodušit. Lze to uvažovat jako filtr nekvalitní technologie, která na náš trh proudí z různých neznámých zdrojů.

Nová zelená úsporám

Současný dotační titul NZU nabízí 4 limity pro fotovoltaiku, jedná se o podoblasti podpory C.3.3 až C.3.6 jak uvádí následující tabulka:

TAB1. Výše podpory v podoblasti podpory C.3 ve 3. výzvě dotačního programu Nová zelená úsporám.

Podoblast podpory	Typ systému	Výše podpory v Kč
C.3.3	Solární FV systém pro přípravu teplé vody s přímým ohřevem	35 000
C.3.4	Solární FV systém bez akumulace elektrické energie s tepelným využitím přebytků a celkovým využitelným ziskem $\geq 1700 \text{ kWh.rok}^{-1}$	55 000
C.3.5	Solární FV systém s akumulací elektrické energie a celkovým využitelným ziskem $\geq 1700 \text{ kWh.rok}^{-1}$	70 000
C.3.6	Solární FV systém s akumulací elektrické energie a celkovým využitelným ziskem $\geq 3000 \text{ kWh.rok}^{-1}$	100 000

Podoblast podpory C.3.3 je určena pro přímý ohřev vody bez střídače a tedy i bez připojení do sítě – jak je popsáno výše. C.3.4 je již pro připojené systémy do sítě s využitím přebytků elektrické energie pro ohřev vody. Tato podoblast vyžaduje instalaci sledování toků elektrické energie v místě připojení k distribuční síti a na základě těchto měřených dat plynule regulovat topné spirály v boilerech, nebo akumulčních nádržích. Snahou je minimalizovat přetoky energie do sítě a tedy maximálně využít vyrobenou elektřinu. Poslední dvě podoblasti C.3.5 a C.3.6 jsou zaměřeny na akumulaci elektrické energie do průmyslových baterií. Rozdíl je pouze v celkovém minimálním využitelném zisku 1700 kWh/rok, resp. 3000 kWh/r.

Následující tabulka 2 uvádí požadované parametry v diskutovaných podoblastech podpory. Jedná se především o minimální využití vyrobené energie v daném objektu 70% a minimální měrnou kapacitu případných akumulátorů, která je 1,75 násobek instalovaného výkonu ve fotovoltaických panelech. Upřesňující vyhláška pak upravuje tento koeficient na 1,25 pro baterie využívající moderní technologie, např. Li-Ion, LiFePO₄, LiFeYPO, apod.

Ve zmíněných podoblastech lze také žádat o dotaci v Podoblasti podpory C.5, která se týká podpory na zpracování odborného energetického posudku. Maximální výše podpory v této podoblasti činí 5 000 Kč, maximálně však 15 % z alokované částky podpory v podoblasti C.3.

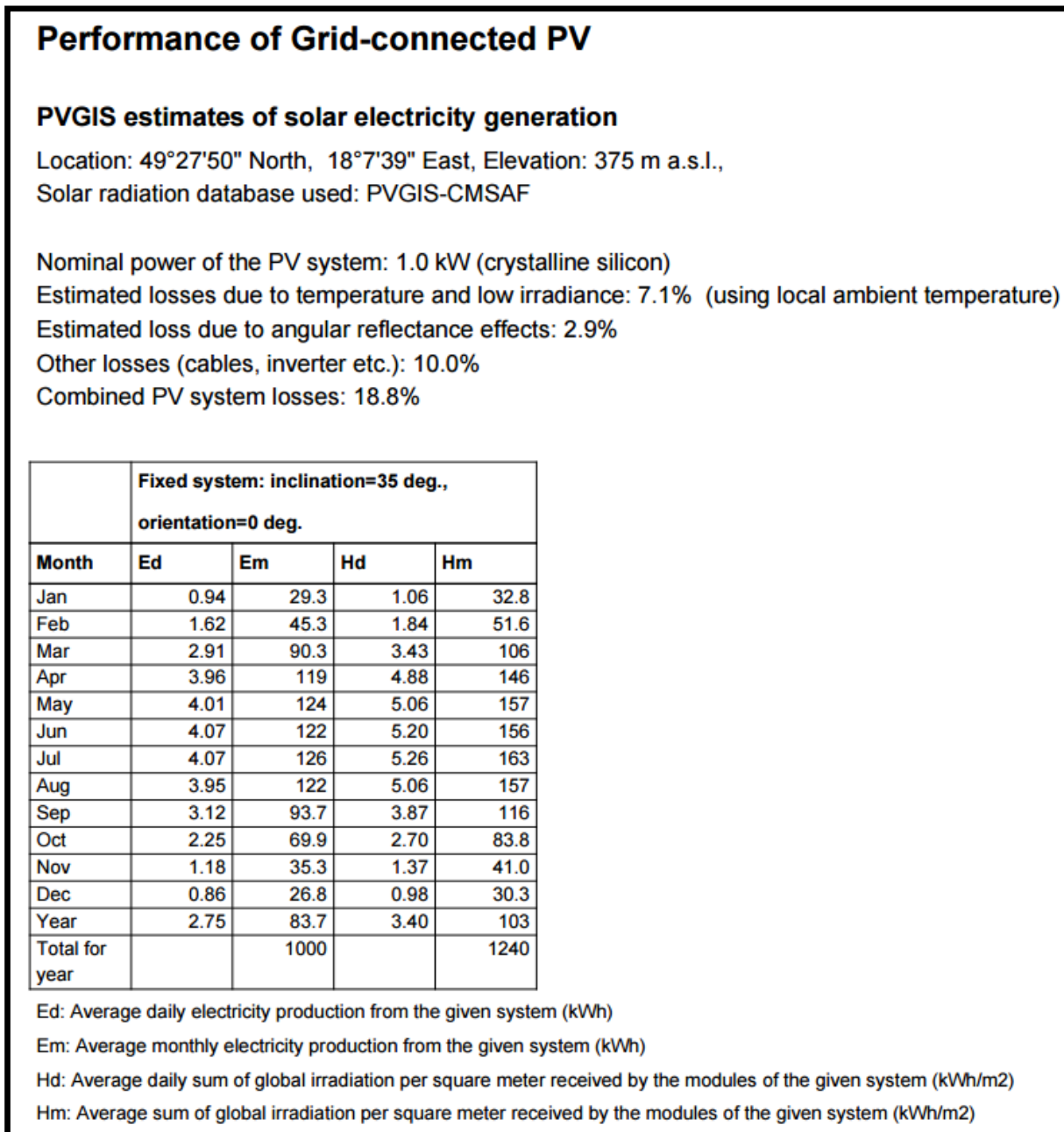
TAB2. Požadované parametry v podoblastech podpory C.3.4, C.3.5 a C.3.6 ve 3. výzvě dotačního programu Nová zelená úsporám.

Sledovaný parametr	označení	C.3.4	C.3.5	C.3.6
Celkový využitelný zisk v budově	QFV.u [kWh.rok ⁻¹]	≥1700	≥1700	≥3000
Minimální míra využití vyrobené elektřiny pro pokrytí spotřeby v místě výroby	[%]	70	70	70
Akumulace přebytků energie do teplé vody	-	Povinná	Možná	Možná
Minimální měrný objem zásobníku teplé vody nebo akumulční nádrže	[l.kW _p ⁻¹]	80	-	-
Akumulace přebytků energie do elektrických akumulátorů	-	Možná	Povinná	Povinná
Minimální měrná kapacita běžných akumulátorů (např. Pb, NiCd)			1,75	1,75
Minimální měrná kapacita moderních akumulátorů (např. Li-Ion, LiFePO ₄ , LiFeYPO)	[kWh.kW _p ⁻¹]	-	1,25	1,25

Reálný energetický přínos

Pro stanovení potřebné velikosti FV systému je nutné využít těchto energetických poměrů a roční vyúčtování od distributora el. energie. Poslední údaj, který k výpočtu chybí, je energetický zisk z uvažovaného systému daného rozsahu v daném zeměpisném umístění se stanoveným sklonem a odchylkou od jihu podle orientace stávající budovy, kde by měla být instalace provedena. K tomuto účelu lze využít portál PVGIS dostupný z webu <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>, který nabídne potřebná data po zadání výše uvedených

parametrů. Pro příklad je vybrána instalace 1 kWp fotovoltaických panelů na střeše střední školy v Rožnově pod Radhoštěm se sklonem panelů 35° a orientací na jih, což lze dosáhnout na rovné střeše vhodnou podkonstrukcí s touto orientací. Následující obr. 1 uvádí výstup portálu PVGIS, ze kterého lze vyčíst průměrné měsíční energetické zisky a také průměrný celoroční zisk, který je 1000 kWh/rok.kWp.



Obr. 1: Příklad výstupních dat analýzy produkce fotovoltaického systému na portálu PVGIS.

V rozvaze o návratnosti investice je nutné zohlednit využitelnost, případně akumulaci, vyrobené elektrické energie s ohledem na její nákupní cenu u distributora a na dostupnost energie z fotovoltaického systému, která je maximální právě v letních měsících. Porovnání aktuálních potřeb daného odběrného místa s aktuální výrobou a tedy i spotřebou vlastní energie může být mnohdy poměrně složitá.

Po rozhodnutí se o instalaci fotovoltaické elektrárny o stanoveném rozsahu lze kontaktovat potenciální dodavatele s žádostí o cenovou nabídku na dodávku na klíč, protože instalaci

může provádět pouze osoba s profesní kvalifikací tzv. Elektromontér fotovoltaických systémů (26-014-H) podle §10d zákona č.406/2000 Sb. a to především v případě čerpání finančních prostředků z veřejných zdrojů.

Výstavba

Po podpisu SoD probíhá příprava a následná výstavba systému všeobecně známými postupy. V rámci projektové dokumentace se stanoví technologie, umístění a orientace fotovoltaických panelů a systém akumulace elektrické energie. Projektová dokumentace musí být potvrzena autorizovaným technikem nebo inženýrem. Přestože statický posudek objektu před instalací systému není nikým vyžadován (pokud si jej nevyžádá stavební úřad), měla by přesto být stavební konstrukce posouzena statikem. Následuje příprava nosné podkonstrukce ať už kotvena do nosných částí objektu, nebo přitížena na rovné střeše. Dále se osadí fotovoltaické panely a propojí se podle projektové dokumentace do jednotlivých stringů. Osadí se střídač, případně baterie nebo systém pro akumulaci energie v podobě ohřevu vody. Proveďte se výchozí revize elektrického zařízení a výstavba ochrany před bleskem – je-li potřeba.

Před uvedením do trvalého provozu systému je nutné požádat o první paralelní připojení výroby, ke kterému je k dispozici žádost u místního distributora. Během vlastního prvního paralelního připojení dojde k ověření instalace, ověření funkce požadovaných bezpečnostních opatření uvedených ve smlouvě o připojení a také dojde k výměně stávajícího elektroměru za čtyřkvadrantní elektroměr, který umožňuje jednak dálkový odečet registrů, ale také měření odběru i dodávky v obou cenových tarifech distributora. Dále je nutné se zvoleným obchodníkem s elektřinou podepsat smlouvu o sdružených službách nebo o dodávce elektřiny, na základě které bude subjekt výrobcí vyplácet cenu za dodanou elektřinu, jejíž minimální výše je dána cenovým rozhodnutím energetického regulačního úřadu. Některé společnosti nabízejí mnohdy i 2x větší částky, než povinné minimální.

Novinkami v tomto roce 2016 je možnost provozu malé fotovoltaické elektrárny (do 10 kWp) bez licence na výrobu elektrické energie. Tím odpadá jistá byrokracie s tím spojená. Podobně se k těmto zjednodušením přidávají i energetické společnosti vykupující elektřinu, které již nutně nevyžadují, aby výrobce elektřiny byl osobou s přiděleným IČ (identifikačním číslem).

Žádost o dotaci

K podání žádosti o dotaci v rámci Nové zelené úsporám je nutné dodat několik dokumentů:

Údaje o žadateli především – tedy jméno, příjmení, rodné číslo, datum narození, email, telefon a číslo účtu, jehož majitelem musí být právě žadatel.

Originál projektové dokumentace včetně autorizace.

Energetický posudek (EP) a krycí list (KL) sestavený energetickým auditorem.

Souhlas spoluvlastníků je dokládán vždy, je-li v KN zapsáno více spoluvlastníků.

Plná moc (bez notářského ověření) je dokládána vždy, je-li žádost o dotaci podávána jinou osobou než žadatelem.

Pro úspěšnou výplatu dotace je dále nutné doložit realizaci těmito dokumenty:

- 1) Ověřený výpis z KN – ne starší 90 dnů.
- 2) Protokoly o dohotovení a převzetí, uvedení do provozu fotovoltaického systému.
- 3) Protokol prvního paralelního připojení do DS, který je vystavován při procesu prvního paralelního připojení a kontrole distributorem.

4) Všechny faktury (i zálohové) související se stavbou FV systému včetně rozpisu všech položek, počet ks a specifikace panelů a střídače včetně SVT kódů. Je-li současně žádaná dotace v podoblasti podpory C.5 – Podpora na zpracování odborného posudku a zajištění měření, je nutné doložit zvláště fakturu za vypracování EP. Všechny faktury musí být fakturovány na žadatele.

5) Výpis z banky o přijatých platbách všech doložených faktur zhotovitelem.

Po zpracování žádosti a doložení realizace dojde k vyplacení dotace.

Závěr:

Přestože je v současné době instalace fotovoltaických systémů ve značné míře závislá na poskytnutí dotace, jejichž podmínky se mohou každým rokem měnit, lze ze zkušenosti z minulých let odvodit jistou podobnost a principiální shodnost. Nejzásadnější změna v následujících letech může nastat v dotačních limitech.

Trendem v instalaci fotovoltaických systémů je snaha o maximální smysluplné využití vyrobené elektrické energie. Tou lze dosáhnout buď akumulací při ohřevu potřebné užitkové nebo topné vody, nebo akumulací v průmyslových bateriích a následné využití energie z baterií v době, kdy je výroba nedostatečná, resp. nulová (v noci). S tímto přístupem souvisí také některá opatření, která je vhodné zavést právě z důvodu snahy o maximální využití vyrobené elektřiny. Těmi opatřeními se myslí přizpůsobení odběrů elektrických spotřebičů a jejich časové plánování. Příkladem může být snaha praní, sušení, vaření právě v časech, kdy je k dispozici vlastní vyrobená elektrická energie. Dojde tak jejímu využití namísto laciného prodeje obchodníkovi s elektřinou. Některé spotřebiče lze řídit v závislosti na aktuální výrobě elektrické energie, například ohřev TUV v letních měsících kdy bývá dostatek vlastní elektřiny lze pomocí řídicích systémů (WattRouter, GreenBonO, UDM60, ENcontrol Power Balancer, BEMS, ETX-ESE apod.) plynule zatěžovat topnou spirálu v nádobě na TUV a tím maximalizovat využití vlastní elektřiny a zabránit tak přetoku do sítě distributora.

Budoucnost instalací fotovoltaických elektráren by mohla být v zavedení tzv. „net meteringu“. Tedy využití distribuční sítě jako veřejného statku k bezplatné akumulaci elektrické energie. Výrobce elektřiny by v ročním souhrnu ze sítě mohl bezplatně odebrat tolik energie, kolik jí tam uložil. Samozřejmě je zde mnoho technických a právních otázek, ale principiálně by tento přístup uvítalo mnoho potenciálních investorů. Net metering již úspěšně funguje v mnoha zemích, jako je USA, Německo, Nizozemsko, Belgie, Itálie, Maďarsko, Dánsko, Španělsko, Francie, Kanada, Brazílie, Mexiko, Panama, Kostarika, Guatemala, Chile, Austrálie.

Literatura

- [1] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) dostupný z <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [2] Oficiální webová prezentace dotačního programu Nová zelená úsporám dostupná na www.NZU.cz.
- [3] Oficiální webová prezentace pro výrobce elektřiny společnosti E.ON dostupná na <https://www.eon.cz/spoluprace-s-vyrobci-elekriny-vykup-elekriny-z-obnovitelnych-zdroju>
- [4] Oficiální webová prezentace spolku Solární asociace dostupná na www.solarniasociace.cz

MODERNÍ ZPŮSOBY UCHOVÁVÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE

Vít BRŠLICA

Katedra elektrotechniky, Fakulta vojenských technologií,
Univerzita obrany v Brně, Kounicova 65, 662 10 Brno

vit.brslica@unob.cz

Abstrakt:

Zavádění solárních a obnovitelných zdrojů energie přináší problém s nemožností regulace dodávky elektrické energie podle okamžité poptávky. Stejně rozprostřená generace vyžaduje ukládání energie a „energy management“ kde kromě inteligentních spotřebičů musí být zásobník energie. Rozvoj komunikační a informační techniky přinesl revoluci v malých bateriích, stejná se očekává v elektromobilitě a spolupráci parkujících elektromobilů s chytrou sítí (smart grid). Na tuto oblast je zaměřen příspěvek.

1. Úvod

Od počátků elektrárství je zásadním problémem udržení rovnováhy mezi generovanou a spotřebovanou elektrickou energií EE v každém okamžiku. Rozdíl výkonu vede ke zrychlování, nebo zpomalování soustrojí generátoru, co ve střídavých soustavách vede ke kolísání frekvence. Rozšiřování sítí snižuje krátkodobou nevyváženost, ale problém nevyrovnanosti denního odběrového diagramu DOD to neřeší, výrobní kapacity EE musí být dimenzovány na maximální výkon a jsou pak většinu času nevyužity, uskladnění EE z období sedla DOD by umožnilo její dodávku v období spotřebitelské špičky, ale jak známo EE se přímo skladovat nedá a u každé přeměny energie vznikají ztráty.

Kromě vyrovnávání DOD závisí kolísání odběru na roční době, povětrnostních vlivech a dalších vlivech společenských a přírodních událostí. Doba, po kterou je třeba energii skladovat, má výrazný vliv na volbu způsobu uskladnění.

Tento článek se nebude zabývat jen ukládáním EE v oblasti velké energetiky. Revoluce ve zdrojích s orientací na obnovitelné zdroje, zejména na solární a větrnou energii přináší obrovské problémy s nevyrovnanou úrovní generovaného výkonu a nemožností jeho regulace s ohledem na okamžitou spotřebu. Zde nabývá význam ukládání velkého objemu energie, nejen pro nouzové osvětlení, které se léta řešilo levnou olověnou staniční baterií, která byla trvale udržovaná v nabitěm stavu malým, tzv. konzervačním proudem.

Dnes už každý slyšel o chytrých sítích budoucnosti (smart grids), o chytrých spotřebičích a měřících odběru se změnou ceny energie podle tržního stavu v průběhu dne. Hovoří se o nezávislých sídlištích a rozprostřené výrobě (distributed generation), ale to všechno jde proti výhodám rozlehlých sítí s možným přeléváním energie. (Negativní důsledky přelévání energie vidíme při přenosu ze severních větrných elektráren přes naše území, když se v EU pravidla dopravy po drátě a po silnici zásadně liší v náš neprospěch.) Ostrovní provoz se bez velké akumulace neobejde, i když může pracovat i s kogeneračními zdroji, které mohou sloužit i jako špičkové zdroje, s tím, že místo EE mohou používat uložené palivo. Především

se ale počítá s velkou baterií elektromobilu a s tím, že většina těchto vozidel bude trvale parkujících ve spojení s místní sítí a bude do ní prodávat potřebnou EE v době špičky a odebírat k uskladnění EE v době jejího přebytku, podle hesla, že trh vyřeší vše. Nás teď bude zajímat, na jakém principu budou fungovat baterie příštích elektromobilů, případně jaká je další možná konkurence těmto drahým zásobníkům.

2. Fyzikální možnosti ukládání energie

Elektrickou energii ($W = \int U I dt$) lze přímo měnit na kterýkoliv druh energie a zase zpět, ale ne každá přeměna je technicky a ekonomicky efektivní.

Mechanická	$m g H$ $\frac{1}{2} J \omega^2$ $\int p dV$	Potenciální Kinetická rotační Stlačený vzduch	Přečerpávání vody Setrvačníky Podzemní zásobníky
Tepelná	$m c \Delta\theta$		Malá účinnost, Problém s izolací a únikem energie
Chemická		Elektrolýza Sekundární články Dvojvrstvý DLSC *	Kovy, vodík ? počet cyklů, účinnost ... <i>superkapacitor</i>
Elektromagnetická	$\frac{1}{2} L i^2$ $\frac{1}{2} C u^2$	Indukčnost Kapacitor	SCMS (supravodivé) ... patenty???

3. Elektrochemické zdroje

Prvním zdrojem EE byly zdroje elektrochemické, založené na kovových elektrodách v elektrolytu, jejichž úbytek hmotnosti byl zdrojem náboje

$$Q = \int i dt$$

A napětí článku U záviselo na rozdílu potenciálů pro jednotlivé kovy, které by měly být od sebe co nejdále (optimálně jeden elektropozitivní a druhý elektronegativní). Záhy byly objeveny sekundární články, které se daly také nabíjet a znovu vybíjet v cyklech.



Obr. 1 Baterie 56 kWh pro elektromobil Tesla

Věnovat se popisu historických systému moc nebudeme, nakonec olověné akumulátory s kyselým elektrolytem (H_2SO_4) jsou díky své ceně nejrozšířenější na planetě a převyšují počtem jednu miliardu. Dodnes lze doporučit pro domácí instalace s fotovoltaickými panely, právě pro bezkonkurenční cenu. Zdokonalenou verzi alkalického Edisonova článku NiFe ve formě NiCd lze dosud potkat v ručním nářadí a v železničních vozidlech, kde slouží desítky let s minimální údržbou, dnes je problém s jedovatostí kadmia, ale jsou plně a snadno recyklovatelné a zatím mají ekologickou výjimku.



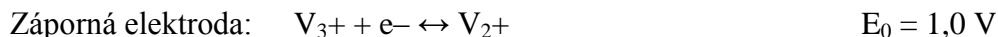
Obr. 2 Články pro trakční baterie s technologií LiFePO₄

Revoluci v akumulátorech přinesla až moderní komunikační a informační technika a výsledkem jsou lithiové články ve všech současných mobilních zařízeních. Japonci před pár lety slibovali stejný nástup v technologii palivových článků, ale dosud se boom nekonal a tak všichni a stále nabíjíme energii ze zásuvky. Pro větší výkony se upravily Lithiové články do podoby železo-fosfatové, které jsou požárně bezpečnější a LiFePO₄ články se vyrábějí ve velikostech až několik set Ah, novější technologie má ještě dotaci yttriem (LiFeYPO₄). Explóze a požár článku ve velké baterii může být velmi nebezpečný, napětí článku je jen kolem 3,6V a tak pro větší napětí kolem 600V musí být mnoho článků v sérii. Problém rozdělení napětí a nestejné kapacity jednotlivých článků je třeba ošetřit a tak se v baterii musí objevit složitý a náročný systém vyrovnávání tzv. BMS (Battery Management System). Pro příklad uvedeme baterii pro elektromobil Tesla (Obr.1), která má 56kWh je složena z 6 831 lithium-iontových článků typu 18650-a má uvnitř více pojistek než je počet článků. Energie odpovídá šesti litrům benzínu, nebo také 48 kg TNT (tuna TNT = 4 184MJ).

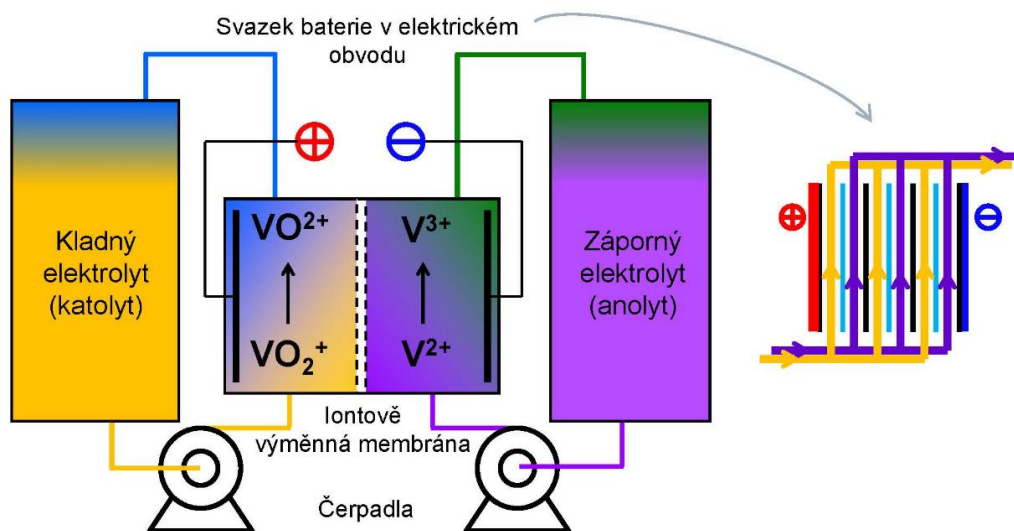
Lithiové technologie se stále vylepšují, od laboratoří do výroby je vždy dlouhá cesta, navíc je důležité zajistit nejen dobré výsledky na pár cyklů, ale snížit stárnutí elektrod a umožnit alespoň tisícovku cyklů při snížení kapacity o méně než 15 – 20%.

Rovněž samovybití je problém, pokud potřebujeme uchovávat energii na delší období. V tomto segmentu se objevily nové technologie na průtočném principu (Obr. 3) separovaného elektrolytu, který je nositelem náboje a to s Vanadiem, „pozitivní“ a „negativní“ elektrolyt se uchovává odděleně mimo samotný článek, ve kterém jsou odděleny membránou a ztráty energie jsou nepatrné i v průběhu měsíců, počet cyklů je téměř neomezený, životnost nejméně 15 let a zdá se, že pro statické aplikace to bude velmi nadějná elektrochemie, jen co skončí patentová ochrana, zatím jsou totiž ceny tak astronomické, že snad překonávají i drahé kovy. Informace z letošního BVV (2016) hovoří o 70 000Eur za 10kWh.

Napětí akumulátoru je v rozmezí 1,2–1,6 V a čistá účinnost tohoto systému může dosahovat až 85%. Během nabíjení a vybití dochází v elektrolytu ke změnám oxidace vanadu. Změny jsou popsány v těchto chemických reakcích:

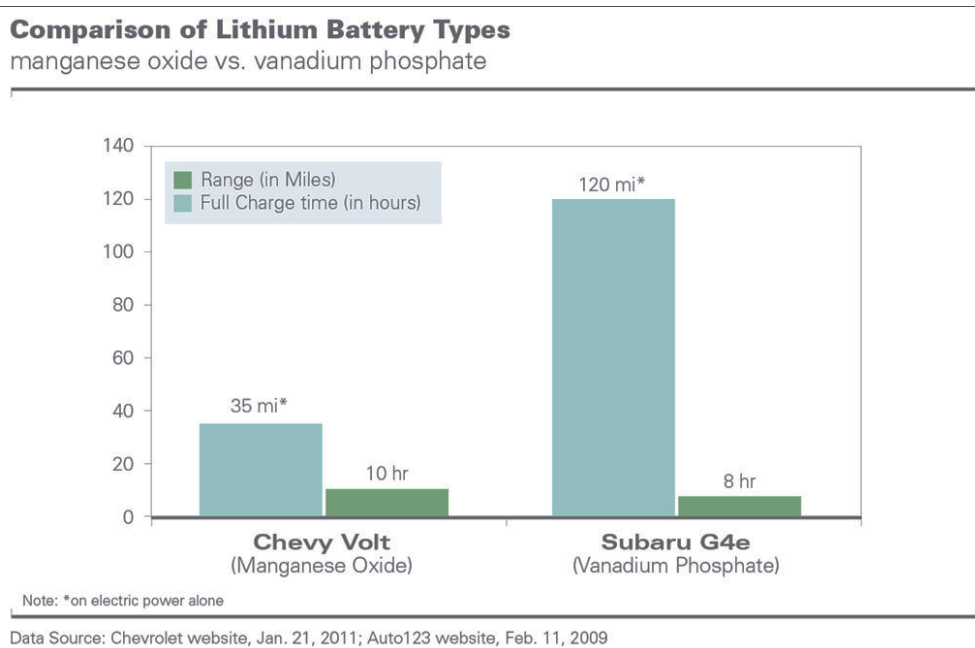


Standartní potenciál článku je tedy $E_0 = 1,26 \text{ V}$ při koncentracích 1M a teplotě 25 °C. Protože se elektrolyty vrací do stejného stavu jako na konci každého nabíjení/vybití, je možno je používat neomezeně.



Obr.3 Průtočná REDOX Vanadová baterie s oddělenými elektrolyty

Vanadium se objevilo také ve vylepšení Lithium-iontové technologie, kde vanadium-fosfát nahradil kysličník mangančitý a dosáhlo se zlepšení parametrů jak v hustotě energie, tak i v rychlosti nabíjení, jak dokumentuje obrázek:

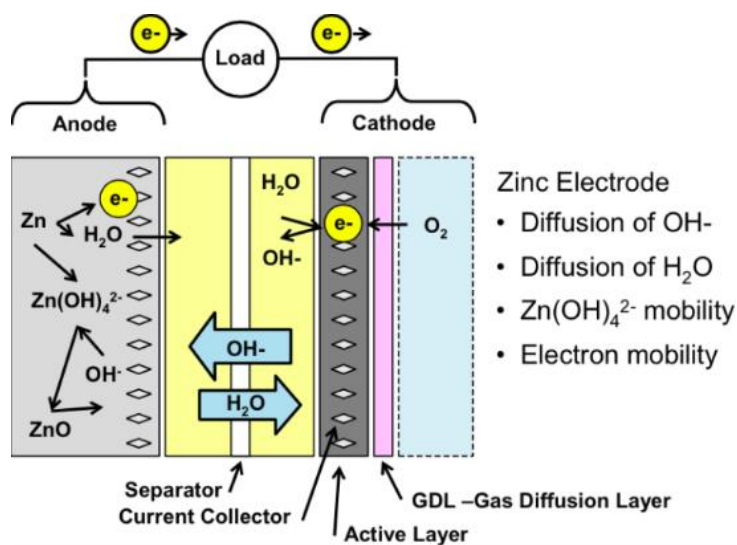


Dávno známé AgZn články s lepší hustotou energie jsou vhodné jen pro velmi specifické oblasti (letectví a kosmonautika např.) i když můžeme dokumentovat i jejich použití v pokusných elektromobilech v USA (Obr. 3), ale výskyt drahého kovu v přírodě neumožňuje masové nasazení z prostého důvodu deficitu.



Obr. 4 Stříbro zinková baterie z USA elektromobilu z roku 1966

Nejnovější úsilí v oblasti elektrochemie se věnuje článkům kov-vzduch (Metal-air), největší teoretická hustota energie je opět pro Lithium (až 43MJ/kg = 12kWh/kg, bez kyslíku), ale i další, lépe dostupné kovy (Zinek, Hliník, Hořčík) dávají teoreticky šanci na vynikající výsledky, ale bude se muset ještě hodně investovat do výzkumu a vývoje. Zatím je největším problémem rychlý pokles kapacity už po jednotkách cyklů. Proto jsou také snahy překonat toto omezení systémy, ve kterých je kovová anoda po vybití nahrazena čerstvou kovovou anodou a systém pokračuje v činnosti, kyslíčník nebo hydroxid kovu se pak podrobí elektrolýze v hutích při recyklaci. Nejlepší současné (cenově dostupné) li-ion baterie mají hustotu energie někde kolem 200 – 250 Wh/kg a už čtyřnásobek této hodnoty by stačil pro rychlý rozvoj elektromobility. Z benzínu se totiž, při účinnosti 12%, získá k pohonu jen cca 1,7kWh/kg.

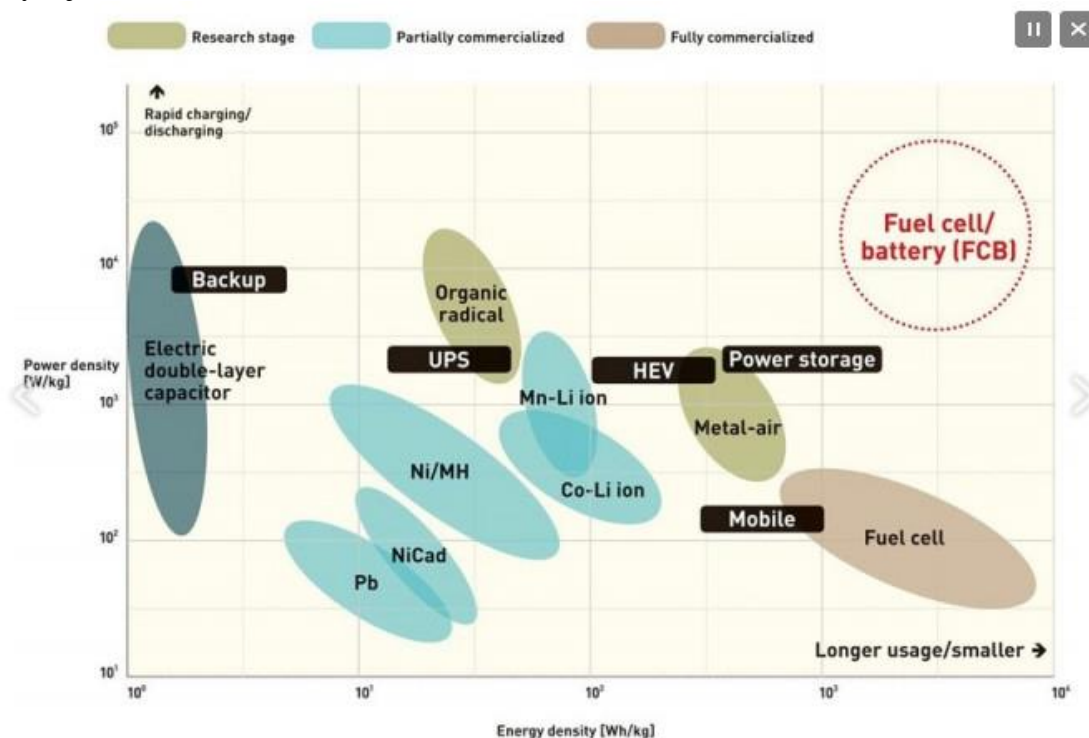


Obr. 5 Schématický náčrt článku Kov-Vzduch

4. Superkapacitory EDLC

Při povrchním pohledu vypadají jako elektrochemické zdroje, ale uvnitř v elektrolytu nedochází k transportu iontů, elektrolyt se pouze polarizuje a napětí článku musí být menší, než je hodnota disociace. Pro vodní elektrolyt je to jen 0,8V, pro organický acetonitril je to kolem 2,8V a pracuje se na ionických elektrolytech, které by vydržely až 8V. Zkratka EDLC znamená Elektrolytický dvouvrstvý kondenzátor (Double Layer).

Tyto revoluční součástky byly vyvinuty v SSSR koncem 1980 let pro vojenské účely, tedy s vodním elektrolytem, který byl v tlakové nádobě, a v případě rozkladu vody mohlo dojít k rekombinaci. V porovnání s elektrolytickými kondenzátory se dosahovalo daleko vyšší hustoty energie, sice stále řádově méně než u akumulátorů, ale výhodou byla mnohonásobně vyšší hodnota hustoty výkonu, kdy velmi malý vnitřní odpor umožnil vyčerpat energii v jednotkách sekund. Další výhodou proti klasickým akumulátorům je počet cyklů, který se pohybuje okolo milionu.

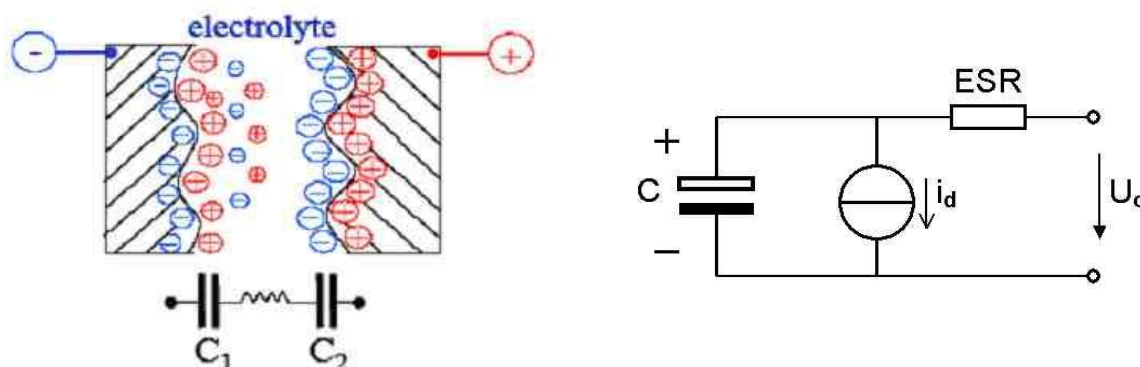


Obr. 6 Přehled a srovnání jednotlivých zásobníků energie (Zdroj: <http://www.extremetech.com/>)

Vysoké kapacity ($C = \epsilon S / d$) se dosahuje obrovským povrchem elektrod z aktivního uhlí, kde na gram elektrody jsou stovky čtverečních metrů a na malé vzdálenosti nábojů na povrchu, které jsou dané rozměry molekuly elektrolytu, takže nanometry. Více je vidět na Obr.7, kde je vpravo i náhradní schéma. Na rozdíl od akumulátoru dochází na kondenzátoru k průběžnému poklesu napětí při vybíjení, a protože je energie rovna $We = \frac{1}{2} C u^2$, tak už při vybití na poloviční napětí zůstává jen čtvrtina energie a níže se s napětím prakticky nechodí.

Z vnitřní struktury je jasné, že výsledná kapacita článku je poloviční vůči kapacitě jedné elektrody, jelikož jsou v sérii. Hodnota vnitřního odporu, značeného v katalogu ESR (Ekvivalentní sériový odpor) bývá hodně malá, takže umožní velký zkratový proud a jeho polovina pak udává maximální výkon. Jak je výše zmíněno je napětí jednoho článku jen cca 3V a tak je třeba spojovat články do série, čímž se snižuje výsledná kapacita a roste odpor. V náhradním schématu vidíme místo odporu samovybíjení náhradní proudový zdroj,

který naznačuje, že samovybitení se s poklesem napětí nezmenší, dlouhodobé ukládání energie se nepředpokládá, respektive není možné.



Obr. 7 Schématický náčrt činnosti EDLC a jeho náhradní schéma

Tabulka dává představu o parametrech jednoho skutečného článku 3000F/2,7V (ve středním sloupci a jak by se parametry měnily jen výměnou elektrolytu.

Tab. 1.

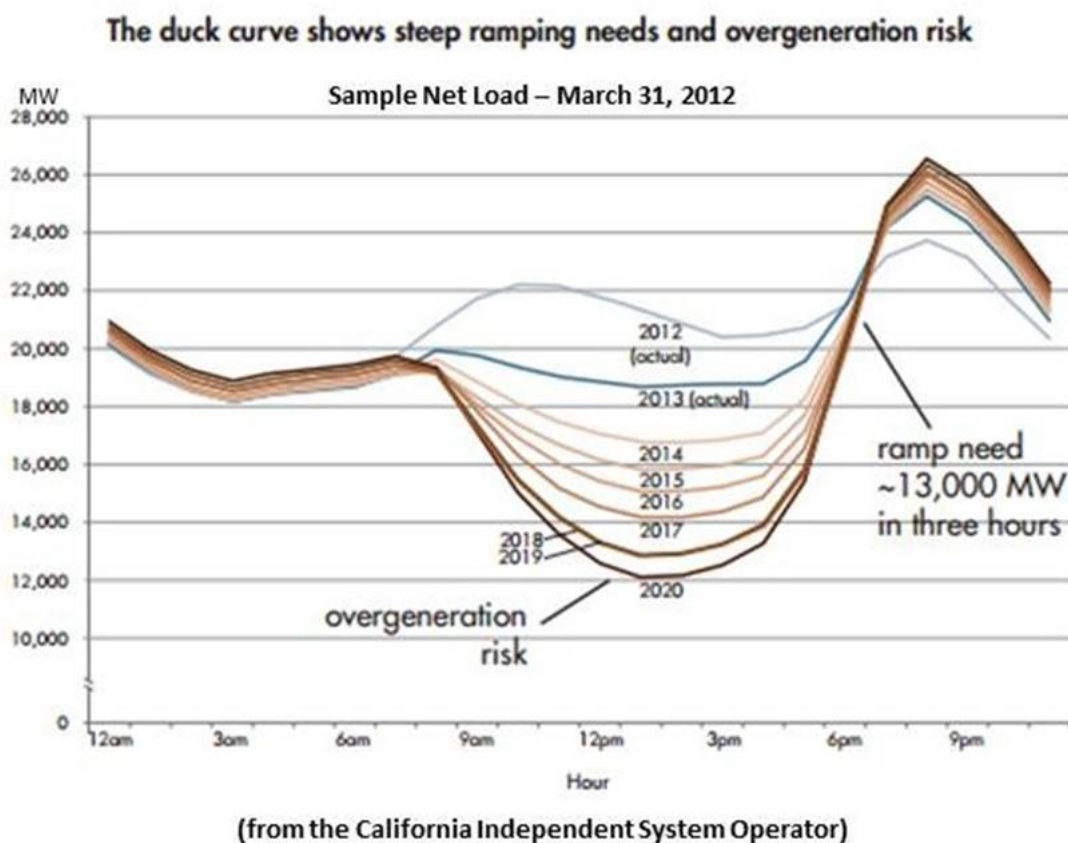
U_{MAX} [V]	0,8	2,7	8	
E_E [J]	960	10 935	96 000	3000F
x	1	11,39	100	
[J/kg]	1 882	21 441	188 235	0,5kg
[Wh/kg]	0,523	5,95	52,3	
75%	0,392	4,46	39,2	

V první dekádě tohoto století se zdálo, že se podaří rychle vylepšit parametr hustoty energie u EDLC s organickým elektrolytem, ale bohužel se neinvestovalo dostatečně do výzkumu a zájem tak zase opadl, zůstaly jen aplikace pro ukládání výkonových špiček, které vznikají při zastávkovém provozu MHD v rekuperaci. Navíc acetonitril je jedovatý, do hermetického systému se nesmí dostat voda a lithiové baterie tento systém téměř vytlačily z trhu. Zůstali jen 2 významnější výrobci.

5. Elektrolýza a palivové články

Hned úvodem této kapitoly je třeba říci, že vodík není primárním zdrojem EE, ale jen způsobem uskladnění a to málo hospodárným, kdy se ani teoreticky nedostaneme v účinnosti cyklu (elektrolýza + palivový článek) nad 50%. Pokud ovšem máme v poledne přebytek EE, kterou získáváme „zadarmo“ ze solárních panelů (fotovoltaiky) FVP, tak i takováto účinnost může být dobrá. Hlavně se vyřeší nebezpečí z „nadvýroby“ EE při větším rozšíření FVP, jak ukazuje „kachní křivka“ na Obr. 8.

Problémy přináší rovněž skladování vodíku, který se těžko utěsní, a navíc tvoří třaskavou směs v širokém rozsahu koncentrací ve vzduchu. Jinak obrovské plynojemy se stavěly třeba u vysokých pecí už před více jak sto lety, ale ne pro vodík. Nakonec by se místo palivového článku dal použít i spalovací motor, který už je vyvinutý k dokonalosti, zatímco vývoj palivových článků je stále v počátcích, největší problém je tedy ono bezpečné ukládání vodíku.



Obr. 8 „Kachní křivka“ v denním diagramu způsobená výrobou EE ve FVP

6. Magnetické pole SMES

Indukčnost a kapacita jsou dva základní prvky elektrických obvodů, jenž ukládají EE do dvou složek elektromagnetického pole. SMES je zkratkou pro supravodivé úložiště (Superconducting Magnetic Energy Storage). Toroid podle obr. 9 má kvazi homogenní pole, které neruší okolí. Kruhové cívky jsou mechanicky odolné proti dynamickým silám.

Tab. 2

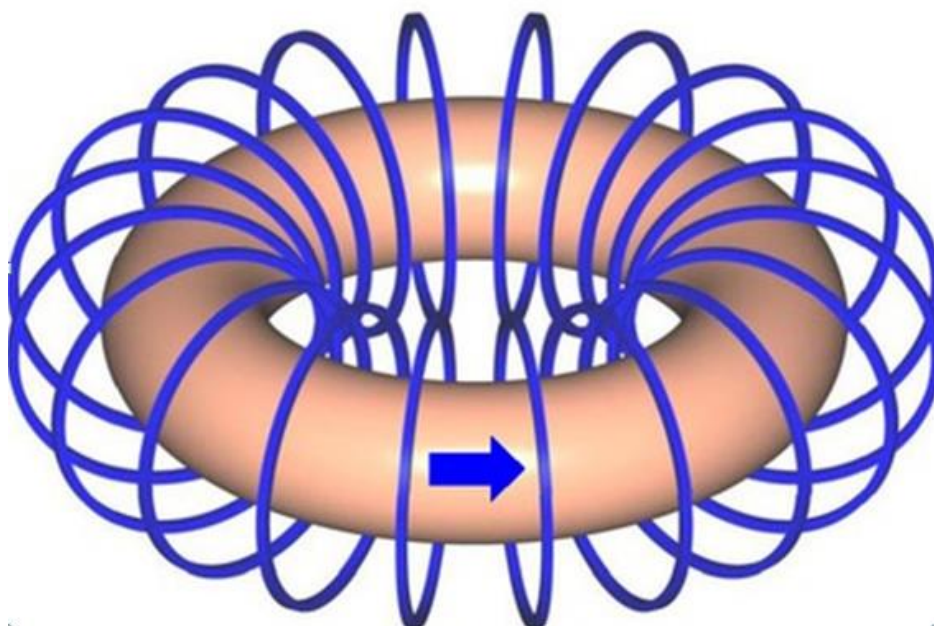
TOROID	střední	vnitřní	vnější
Průměry toroidu D_x [m]	8	6	10
Délka siločáry l_x [m]	25,12	18,84	31,4
Průřez tuby S_m [m ²]	3,14		
Magnetická indukce B_x [T]	0,10	0,13	0,08
Intenzita pole H_x [kA/m]	79,6	106,2	63,6
Magnetické napětí [A]	2 000 000		

Pro numerickou ilustraci uvažujme toroid s vnějším průměrem 10m a průměrem „trouby“ toroidu 2m, vybuzený tak, aby indukce na střední siločáře byla jen $B_s = 0,1T$, čemuž odpovídá $H_s = 80kA/m$ potřebuje magnetické napětí 2MA. Při budícím proudu **100A** to znamená 20 000 závitů, Tab. 2. Měděné vinutí by mohlo být z vodiče o průřezu $20mm^2$, při délce jednoho závitu 6,28m bychom spotřebovali 125km vodiče o hmotnosti 22,4 tuny (!), odpor takového vinutí by byl 1140ohmu a úbytek na odporu vinutí by byl 11,5kV. Indukčnost by byla úctyhodných 63 Henry, ale uložená energie jen 0,3MJ, což odpovídá tak 0,01 litru benzínu.

Tab. 3

			Poznámka
Průřez vodiče	20 mm ²		J = 5A/mm ²
Délka závitu	6,28 m	125 600	metrů vodiče
Odpor jednoho závitu	0,005709091 Ohm	22 357	kg Cu
Odpor celého vinutí	114 Ohm		N = 20 000
Úbytek napětí na odporu cívky	11 418 Volt		1,1MW!!!
Joulové ztráty ve vinutí	1 141 818 Watt		pro kontrolu RI ²

TOKAMAK



Obr. 9 Principiální uspořádání magnetického pole do toroidního prostoru

Více lze najít v tabulce Tab. 3. Jiná bude situace, když se vinutí udělá ze supravodiče, kdy odpor klesne na nulu a zůstane jen odpor spínače, ke kterému jsou vývody cívky vyvedeny. Zvýšením proudu na desetinásobek se desetkrát zvýší jak magnetické napětí, tak i magnetický tok a uložená energie se zvýší stonásobně. Při dalším desetinásobném zvýšení magnetického napětí, tedy buď proudu, nebo počtu závitů se dostaneme na střední hodnotu indukce $B_s = 10\text{T}$ a na další stonásobné zvýšení uložené energie. Další zvyšování není možné, protože by se překročila kritická hodnota B a supravodič by ztratil supravodivost. Ještě je třeba poznamenat, že pro střední $B_s = 10\text{T}$ bude na nejkratší siločáře na vnitřním průměru $B_i = 13\text{T}$ a na vnějším průměru na nejdelší siločáře jen $B_e = 8\text{T}$, poměr B zůstane stejný jako v Tab. 2.

Tab. 4

	0.1T	1T	10T
Objem magnetického pole V_m	78,8 7m3		
Hustota energie mg pole $w_m = \frac{1}{2} B H$	3 981 J/m3		
Celková uložená energie	314 000 J	31,400,000	3,140,000,000
$W_m = w_m V$	0,3 MJ	31MJ	3,1GJ
Indukčnost $L = 2W_m / I^2$	63 H		
Mg vodivost $G_m = \mu_0 S_x / l_x$	0.000000157 H		
$L = G_m N^2$	62.8 H		

Maximální energie stejná jako ve 100 litrech benzínu není dost velká, aby se budovalo supravodivé magnetické úložiště EE, jeho smysl je ve výkonu, který se dá dosáhnout v krátkodobém vybíjení, nebo nabíjení, čímž se udržuje stabilita kmitočtu. Ke stejnému účelu se dnes používají především rotační zásobníky EE moderní konstrukce, kdy setrvačnick se točí vysokou úhlovou rychlostí ve vakuu, aby se odstranily ztráty třením. Také ložiska s magnetickým závěsem jsou téměř bez mechanických ztrát. Takového řešení je zatím levnější ve srovnání s náklady na kryotechniku pro provoz SMES.

7. Superkapacitory s pevným dielektrikem

V této kapitole budeme vycházet z analogie (Tab. 5) mezi magnetickým a elektrickým polem, které je trochu náročnější na pochopení. U magnetického pole rozdělujeme materiály jen na feromagnetické a ostatní, malé odchylky permeability u dia- nebo para- magnetik nejsou z hlediska ukládání energie podstatné, ve feromagnetikách se uloží vždy jen málo energie, díky jejich nelineárnosti a limitaci magnetické indukce. Nasycení se dosáhne už s malým magnetickým napětím a proto i energie ve feromagnetiku je vždy menší, než v nevodivé vzduchové mezeře. U elektrického pole nelimituje náboj Q (analog toku Φ) ale napětí a čím vyšší permitivita, tím větší náboj lze uložit s následkem větší uložené energie.

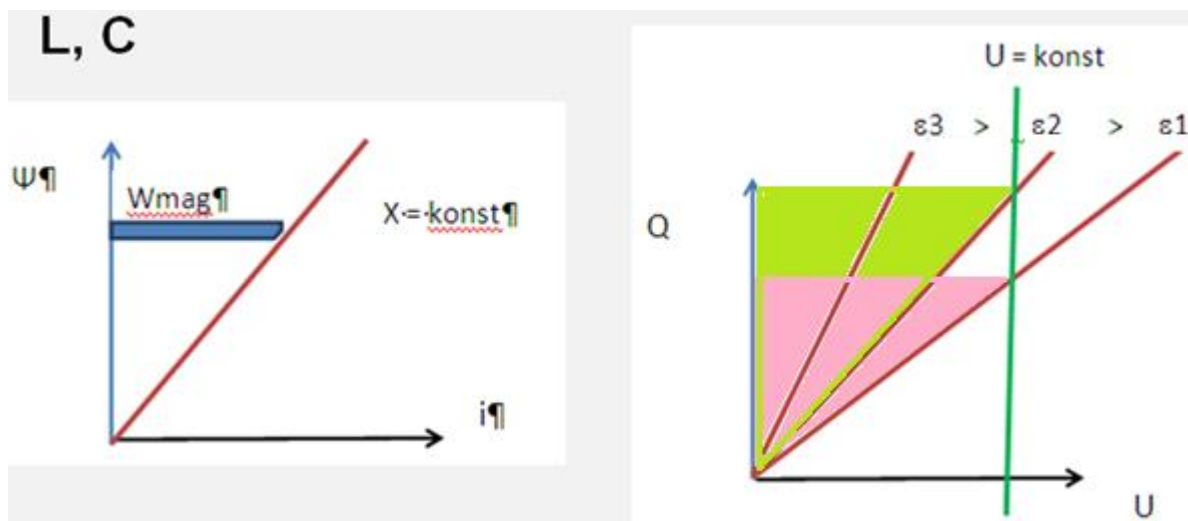
Tab. 5

$dW = u(t) i(t) dt$		$P = u(t) i(t)$	
Náboj:	$dQ = i(t) dt$	Mg tok:	$d\Phi = u(t) dt$
	$dW = u(t) dQ$		$dW = Ni(t) d\Phi$
	$W = \frac{1}{2} E \times D S = \frac{1}{2} E D V$		$W = \frac{1}{2} H \times B S = \frac{1}{2} H B V$
	$dQ = C du$		$d\Phi = L di$

Elektrické pole je uloženo v dielektriku mezi elektrodami (polepy) a u zásobníku nás obvodově zajímá jeho kapacita C a maximální napětí U_{MAX} . Opět platí formální analogie a dualita mezi indukčností a kapacitou Tab. 6.

Tab. 6.

	Indukčnost L	Kapacita C
	$C = \epsilon (S/x)$	$L = \mu (S/x)$
Základní rovnice	$U = L di/dt$	$I = C du/dt$
Integrační forma	$N\Phi = udt = LI$	$Q = idt = CU$
Uložená energie	$E_E = \frac{1}{2} Li^2$	$E_E = \frac{1}{2} Cu^2$



Obr. 10

Již u EDLC jsme uvedli, jak se dosahuje obrovských hodnot C , ale tam byl problém velmi malého napětí na kondenzátor. Průkopníci keramických superkapacitorů se místo velkého povrchu elektrod S zaměřují na dielektrikum s mimořádně velkou permitivitou ϵ , která musí být teplotně stabilní. Vliv permitivity na velikost uložené energie demonstruje Obr. 10.

Tab. 7

		E (V/m)	we (J/m ³)	(Wh/m ³)	(Wh/l)
vzduch	10kV/cm	10E6	10		
PE	10V/um	10E8	100k	30	0,03
	10V/nm	10E10	1G	300k	300

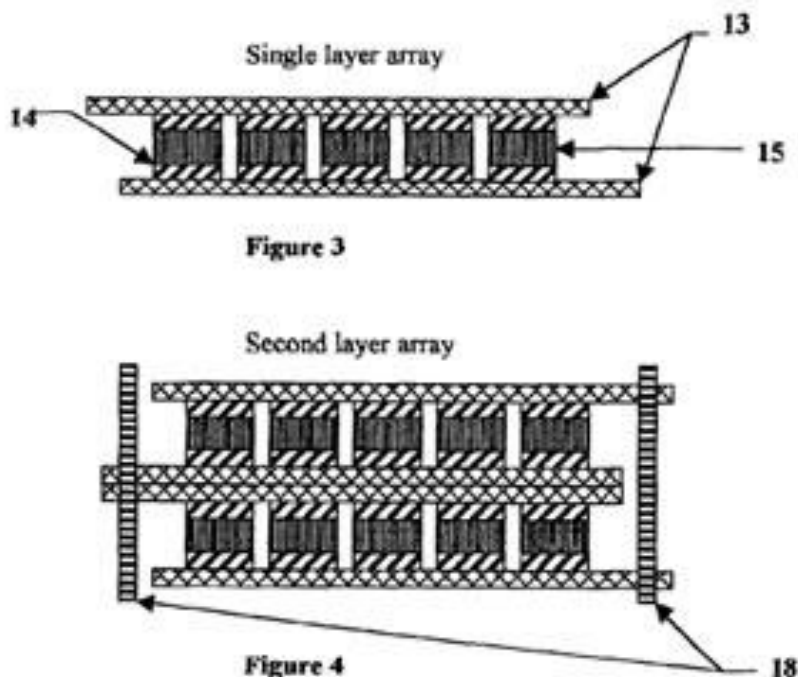
Další naděje je v rostoucí hodnotě E (V/m) se zmenšováním tloušťky dielektrika a tam je naděje rovněž nanotechnologiích. Hustotu energie v dielektriku lze totiž napsat také takto:

$$we = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \text{ (J/m}^3\text{)}$$

a podobně jako u SMES rostla hustota se čtvercem B , zde roste se čtvercem E , takže pokud se při velmi tenkých vrstvách podaří zvýšit elektrickou pevnost E tak se může dojít k velmi lákavým hodnotám převyšujícím současné lithiové baterie jak uvádí Tab. 7.

V první dekádě bylo patentováno spousta řešení úložišť EE s keramickými kondenzátory, kterých ohlašované parametry měly porazit benzinovou nádrž, nejznámější byl EESore amerického autora R. D. Weira z Texasu, který připravoval a verifikoval dielektrikum s titanem barya v polyetylenu, měl výhradní smlouvu s firmou ZENN (Zero Emission, No Noise) v Kanadě, později uzavřel i smlouvu s největším zbrojním gigantem **Lockheed – Martin** ... jen ohlášená baterie se dosud na trhu neobjevila. Na Obr. 11 je představa autora podle jeho patentní přihlášky, jednotlivé „kostičky“ Superkapacitorů se spojují v baterii.

Baryum a kysličníky titanu jsou vůbec oblíbená dielektrika u podobných patentů.



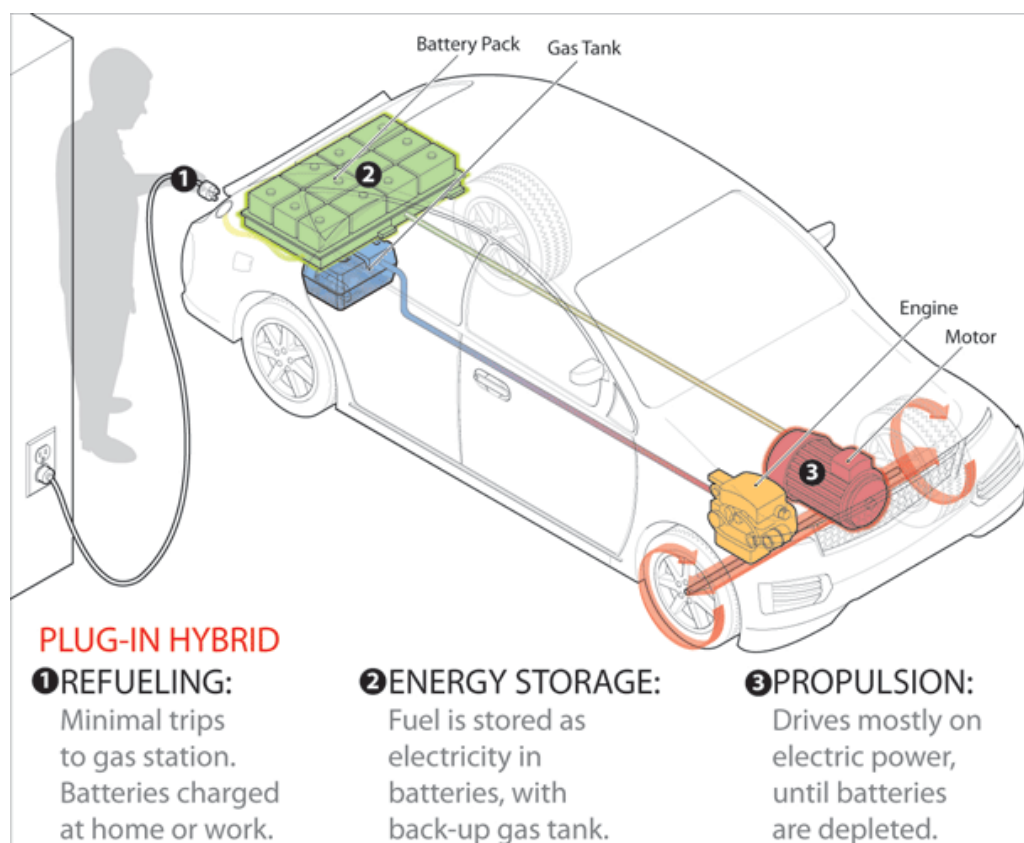
Obr. 11 Schéma uspořádání BaTi kondenzátorů podle patentní přihlášky

8. ZÁVĚRY

V příspěvku jsme se vůbec nezabývali elektromechanickými přeměnami, které jsou dosud pro elektrárenství nejdůležitější, protože jsou léty prověřené a cenově dostupné. S rozvojem rozptýlené výroby budou nabývat vliv právě moderní, zde načrtnuté technologie pro menší objemy energie pro jednotlivé rodiny nebo obytné domy. Tam kde elektřina neslouží k vytápění, může v průběhu pár let dojít k úplnému odstřižení od veřejné sítě, zejména když u nás se nedaří prosadit možnost použít síť jako zásobník energie a rozdíl mezi výrobní cenou a cenou pro koncového zákazníka mnohdy přesahuje tisíc procent. Pak může nastat podobný vývoj, jako proběhl v telekomunikacích před 15 lety, kdy na rozdíl od západních zemí se u nás houfně rušily pevné telefonní linky.

Kudy se bude ubírat vývoj automobilů bez spalovacího motoru, rovněž určí právě moderní sekundární zdroje EE s vysokou hustotou energie. Možnost dovézt si EE v kufru zásadně změní systém distribuce a obchodu s EE. Tato revoluce už je za dveřmi.

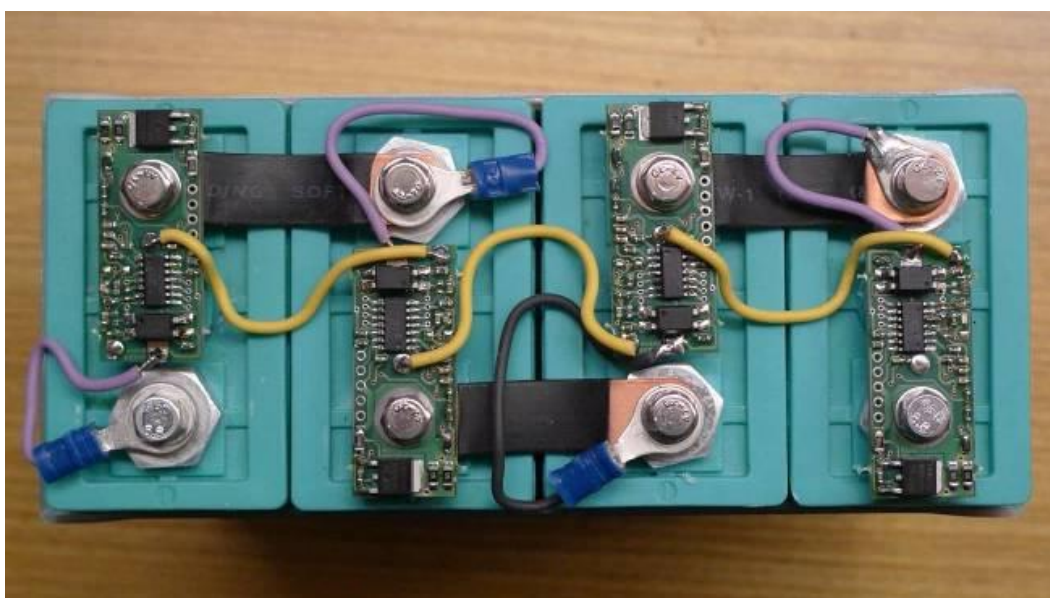
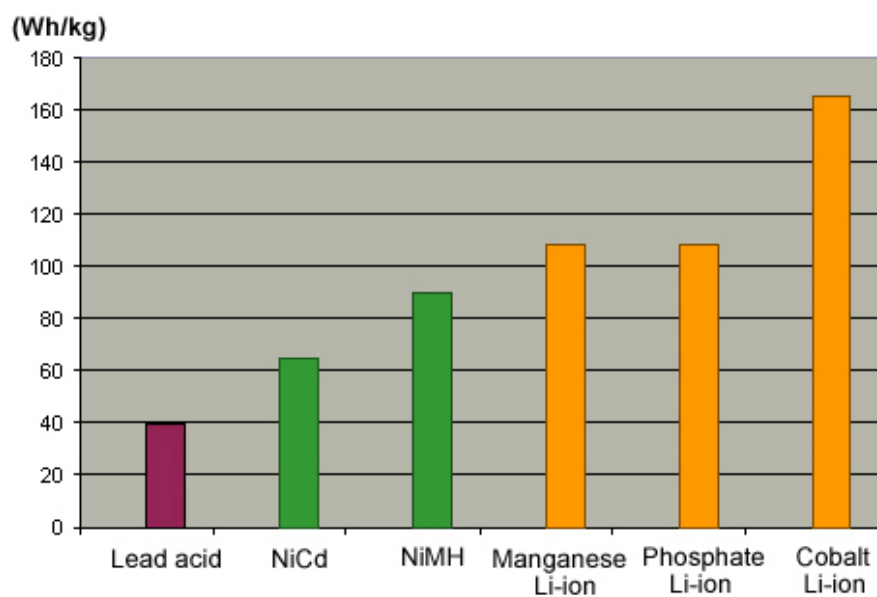
Ještě malá poznámka k rychlonabíjení. Síť EE není stavěná na výkonové nárazy, plnit nádrž benzínem rychlostí litr za sekundu nikoho nepřekvapuje (Obr. 13), přitom jde o výkon 33MW(!), tolik odebírá z troleje deset lokomotiv ve špičkovém zatížení.



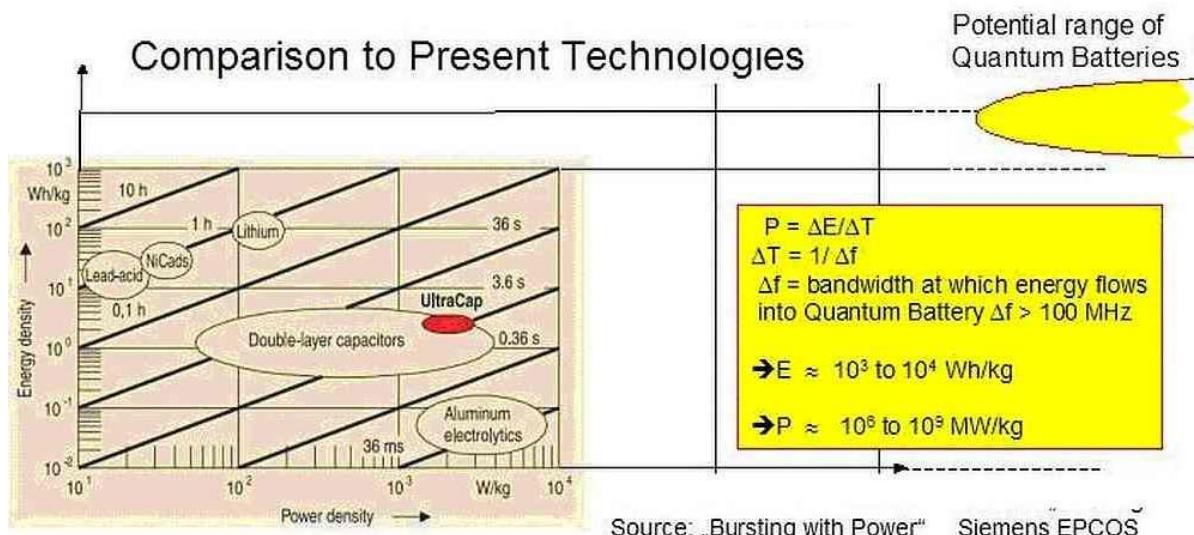
Obr. 13. Rychlost tankování energie určuje výkon nabíječe.

Literatura

- [1] P. Hansen, Multilayer Performance Capacitor with High Dielectric Constant Material, *Patent No US 6,078,494*, June 20, 2000
- [2] Y.K. Jeong, J.H. Lee, S.J. Won, Capacitor Including a Dielectric Layer Having an Inhomogeneous Crystalline Region and Method of Fabricating the same, *Patent No US 7,125,767 B2*, Oct.24, 2006
- [3] R.D. Weir and C.W. Nelson, Electrical-Energy-Storage-Unit (EESU) Utilizing Ceramic and Integrated Circuit Technologies for Replacement of Electrochemical Batteries, *Patent Application US 2006/020779 A1*, Sept. 21, 2006
- [4] R.D. Weir and C.W. Nelson, Method of Preparing Ceramic Powders Using Chelate Precursors, *Patent Application US 2007/0148065 A1*, Jun. 28, 2007
- [5] R.D. Weir and C.W. Nelson, Method of Preparing Ceramic Powders Using Ammonium Oxalate, *Patent Application US 2008/0031796 A1*, Feb. 7, 2008
- [6] E.J. Dowgiallo, High Performance Capacitor with High Dielectric Constant Material, *Patent No US 7,428,137*, Sept 23, 2008
- [7] S.G. Narendra and S.Y. Borkar, Integrated Ultracapacitors as Energy Source, *Patent No US 7,324,328 B2*, Jan. 29, 2008
- [8] R. Eisenring, Method of Storing Electricity in Quantum Battery, *Patent Application US 2008/0016681 A1*, Jan. 24, 2009
- [9] S.G. Ehrenberger and L. Cao, Nanoparticle Ultracapacitors, *Patent Application US 2008/0316678 A1*, Dec. 25, 2008



BMS (Battery Management System) pomáhá k rovnoměrnému namáhání článků v sérii



EEStor <https://en.wikipedia.org/wiki/EEStor>

The following is how the EESU is claimed to compare to [electrochemical batteries](#) used for electric cars.^[4]

	Ceramic EESU	NiMH	Lead-acid(Gel)	Lithium-ion
Weight (kg/lbs)	135/300	780/1716	1660/3646	340/752
Volume (litres/cubic inches)	74.5/4541	293/17,881	705/43,045	93.5/5697
Self-discharge rate	0.02%/30 days	5%/30 days	1%/30 days	1%/30 days
EV Charging time (full) - 100% charge	3-6 min	> 3.0 h	3-15 h	> 3.0 h
Life Reduced with deep cycle use	none	very high	high	very high
Hazardous Materials	none	yes	yes	yes
Temperature vs. effect on energy storage	negligible	high	very high	high

- No degradation from [charge/discharge cycles](#) ^[4]
- In January 2008, [Lockheed-Martin](#) signed an agreement with EEStor for the exclusive rights to integrate and market EESU units in military and homeland security applications.^[33] In December 2008, a patent application was filed by [Lockheed-Martin](#) that mentions EEStor's patent as a possible electrical energy storage unit.^[34]
- In September 2008, Light Electric Vehicles Company announced an agreement with EEStor to exclusively provide EEStor's devices for the two and three wheel market.^[35]
- ZENN Motor Company Inc. has changed its name to "EEStor Corporation" to better reflect the focus and activities of the Company. The name change was approved by shareholders at the Company's annual and special meeting held on March 31, 2015.

<http://bariumtitanate.blogspot.cz/2015/04/the-end-of-theeestory.html>

ČTVRTÁ PRŮMYSLOVÁ REVOLUCE

Vladislav Musil

Vysoké učení technické v Brně

musil@feec.vutbr.cz

Abstrakt:

V posledních týdnech a měsících se stále více v odborném i populárním tisku setkáváme s pojmem čtvrté průmyslové revoluce. Sám pojem průmyslové revoluce je nám důvěrně známý již od školních let [1, 2, 3].

První průmyslová revoluce se odehrávala od konce 18. století, kdy lidskou práci poprvé začaly ve větším měřítku přebírat stroje. Stěžejní roli v tomto procesu sehrál parní stroj. Masivní nástup mechanizace do průmyslu (nejprve lehkého) a později zemědělství vedl k prudkému růstu produktivity práce, a posléze i k rozsáhlým společenským, kulturním a politickým změnám.

Druhá průmyslová revoluce přišla asi o 100 let později (od začátku 20. století), kdy nastalo období elektrifikace a motorizace. Přelomovými vynálezy této éry byly elektrická žárovka (Thomas Alva Edison), elektrický transformátor (Nicola Tesla) a spalovací motor (Gottlieb Daimler). Jiné označení je technická revoluce.

Třetí průmyslová revoluce začala na konci 60. let dvacátého století s nástupem výpočetní techniky, která umožnila automatizaci řady odvětví lidské činnosti a urychlila technický vývoj. Alternativně se hovoří o tzv. vědeckotechnické revoluci (termín zavedl J. D. Bernal).

O **čtvrté průmyslové revoluci** se začalo hovořit teprve nedávno na počátku aktuální dekády. Má to být revoluce pro 21. století. Myšlenka čtvrté průmyslové revoluce pochází z průmyslu. Na veletrhu v Hannoveru v roce 2011 byl použit výraz Industrie 4.0 neboli Průmysl 4.0.

Na veletrhu v Hannoveru v roce 2013 již byl koncept Industrie 4.0 detailně rozpracován ve zprávě pracovní skupiny (iniciativy) Industrie 4.0 (H. Kagermann [7]): „ ... zavedení Internetu věcí a služeb do výrobního procesu představuje nástup čtvrté průmyslové revoluce. ...“

V budoucnosti budou podniky založeny na globální síti, která bude zahrnovat jejich stroje, skladové systémy a výrobní zařízení v podobě kyber-fyzických systémů (Cyber-Physical Systems, CPS). ...“

Tabulka 1: Charakteristika průmyslových revolucí

č.	motto:
1	pára – mechanizace (století páry)
2	elektřina – strojová velkovýroba
3	informační a komunikační technologie do výroby (ICT) - automatizace
4	kyberneticko-fyzické systémy, automace, evoluce od vestavěných systémů ke kyberneticko-fyzikálním systémům

První tři průmyslové revoluce proběhly spontánně jako důsledek dobového průmyslového rozvoje a teprve následně byly popisovány. Iniciativa Industrie 4.0 však popisuje průmyslovou revoluci dopředu (to co ještě není).

Němečtí průmyslníci předpokládají, že jejím výsledkem bude téměř naprostá automatizace výroby (=automace), včetně kontrolních a řídicích procesů, které dnes stále obstarávají lidé. Továrny v éře Industrie 4.0 se budou řídit kompletně samy.

Samo označení je výpůjčkou z počítačové terminologie, jako verze programu, a tak můžeme generovat označení:

Industrie 4.0 - Industry 4.0 - Průmysl 4.0 – Práce 4.0 a dokonce Kvalita 4.0 (i kontrolní procesy budou automatizovány).

Tabulka 2: Postup mechanizace a automatizace výroby

mechanizace	automatizace	automace
mechanizovaná výroba	automatizovaná výroba	automatická výroba
ovládání	regulace	řízení

1. Charakteristika Průmyslu 4.0

Nejprve se musíme ptát, zda „upgrade“ z dosavadního Průmyslu 3.0 na 4.0 je revolucí nebo evolucí. Myšlenka Průmyslu 4.0 je revoluční, představuje kvalitativní myšlenkový skok v evoluční technologické křivce. Je to obojí - revoluční zřetězení evolučních změn (revoluční evoluce). Technologie jsou připraveny, nyní se jich musí chopit „průmyslníci/revolucionáři“, které musíme vychovat, než se revoluce stane skutečností. Slovo revoluce je zde také kvůli marketingu, aby novináři, učitelé a popularizátoři techniky měli zvukomalebný slogan, jak ukazuje schéma:

Revoluce – Evoluce – rEvoluce

Další užitečnou otázkou je, kdy začne Průmysl 4.0? Odpověď je, že již začal. Vzorem pro Průmysl 4.0 jsou automobilové továrny, které již nyní pracují s vysokým stupněm automatizace. Linky jsou vysoce automatizované, mají zabudované kontrolní systémy a mnohdy je automatizovaná i logistika dílů v rámci továrny. Průmysl 4.0 znamená další posilování tohoto trendu a jeho rozšiřování do dalších oblastí výroby, eventuálně i služeb. Proto je to především evoluce. Další příklady téměř úplné automatizace najdeme při osazování desek plošných spojů nebo výrobě čipů integrovaných obvodů.

Myšlenky Průmyslu 4.0 vycházejí z dosavadního vývoje počítačové podpory výroby a inženýrských činností. Podporu inženýrské činnosti označujeme tradičně zkratkou CAD (Computer-Aided Desing). Postupným vývojem vznikla řada dílčích počítačem podporovaných disciplín (CAD nyní označuje kreslení výkresů (drafting)):

CAE - Computer-Aided Engineering, obsahem je podpora tvůrčí inženýrské práce, inženýrských výpočtů, ...

CAM - Computer-Aided Manufacturing (výroba),

CAT - Computer-Aided Testing (testování),

CIE - (Computer Integrated Engineering) = CAE + CAD + CAT,

CIM - (Computer Integrated Manufacturing) = CIE + CAM + ASŘ
(automatizované systémy řízení).

Průmysl 4.0 silně podporuje a rozvíjí myšlenku **Smart Factory**, která vznikla zobecněním pojmu CIM (Computer Integrated Manufacturing), a to především díky rozvoji metod umělé inteligence i rozvojem počítačových a komunikačních technologií. V současnosti je hlavní myšlenkou Průmyslu 4.0 právě Smart Factory: Počítačovým propojením výrobních strojů, opracovávaných produktů a polotovarů všech dalších systémů a subsystémů průmyslového podniku vytvořit inteligentní distribuovanou síť, přičemž subsystémy pracují relativně autonomně, navzájem dle potřeby komunikují (a vývojově směřují k samostatné predikci). [6, 7]

2. Průmysl 4.0 z hlediska uživatele

Průmysl 4.0 z hlediska uživatele je založen především na následujících 4 technologických konceptech (pilířích):

- 1) Kyberneticko-fyzikální systémy (CPS) jako základ průmyslu (digitalizace, robotizace a automatizace výrobních procesů v průmyslu.) Technologie je nyní na takové výši, že lze bez problémů, pouze s mohutnými investicemi, předat úkony, které se dají automatizovat, do rukou strojům. Jmenovitě aditivní výroba (3D tisk) [13, 18, 19]
- 2) Internet věcí (IoT) umožňuje vzájemnou spolupráci (ovládání) mezi subsystémy i jejich spolupráci s člověkem (ovládání na dálku za pomoci Internetu)
- 3) Internet služeb (IoS) a Digitální ekonomika. IoS nabízí nejrůznější služby uvnitř dílny, organizace i napříč organizacemi + zprostředkování počítačových služeb za pomoci Cloud systému i pro občany. Veškerý obchod a transakce lze provádět online.
- 4) „Big Data & Clouds“ umožňují sběr, ukládání a analytické zpracování rozsáhlých souborů dat, umožňují pracovat se sémantikou a ontologiemi, analýzou lze detekovat „neviditelné procesy a vlastnosti.“ [6, 7]

3. Průmysl 4.0 z hlediska informatika

Průmysl 4.0 z hlediska informatika je založen na následujících programátorských/informatických konceptech:

- 1) Interoperabilita: schopnost CPS, lidí a všech komponent Smart Factories spolu komunikovat prostřednictvím IoT a IoS.
- 2) Virtualizace: schopnost propojování fyzických systémů s virtuálními modely a simulačními nástroji.
- 3) Decentralizace: rozhodování a řízení probíhá autonomně a paralelně v jednotlivých subsystémech.
- 4) Schopnost pracovat v reálném čase: dodržení požadavku reálného času je klíčovou podmínkou pro libovolnou komunikaci, rozhodování a řízení v systémech reálného světa.
- 5) Orientace na služby: preference výpočetní filosofie nabízení a využívání standarních služeb, to vede na architektury typu SOA (Service Oriented Architectures).
- 6) Modularita a rekonfigurabilita: systémy Industry 4.0 by měly být maximálně modulární a schopný autonomní rekonfigurace a auto-matického rozpoznání situace.
- 7) Konvergence a propojování technologií - agentové technologie, komunikační technologie, datové a znalostní technologie, výpočetní prostředky [6, 7].

4. Průmysl 4.0 ve světě, v Evropě a v České republice

Hlavní obsahem Průmyslu 4.0 má být (bude) digitalizace výroby – založená na rychlém Internetu. Všechny objekty, budou připojeny k Internetu. Důležitou roli mají hrát cloudová úložiště, trojrozměrný tisk, datová centra, automatické hlášení problémů či "chytré sklady" samy informující o docházejících zásobách.

Řadu těchto prvků lze samozřejmě vidět už i v Česku, po nástupu Průmyslu 4.0 mají všechny tvořit jeden velký systém. "Senzory, stroje, výrobky a informační systémy budou v rámci celého výrobního řetězce v každém podniku propojené. Díky internetovým protokolům si dokážou mezi sebou vyměňovat informace, analyzovat data, konfigurovat je, předcházet chybám a přizpůsobovat se změnám." [6, 7, 14]

Rámec Evropské unie: Posílit konkurenceschopnost evropské ekonomiky je jednou z hlavních priorit Evropské unie. Nejvýraznější formulací této priority politiky EU je Lisabonská strategie (posílení evropské konkurenceschopnosti), přijatá na summitu Evropské rady v Lisabonu v březnu 2000. Na ni navazuje tzv. strategie Evropa 2020 pro období 2010 až 2020. Klíčem k dosažení cílů strategie Evropa 2020 pro inteligentní, udržitelnou a solidární ekonomiku je projekt Unie inovací z 6. října 2010 s cílem zlepšit rámcové podmínky a přístup k financím pro výzkum a inovace v Evropě, aby inovativní nápady mohly být přeměněny na výrobky a služby, které pak vytvářejí růst a pracovní místa. [12, 20]

Obdobné iniciativy ve světě. Po celém světě existuje několik sdružení a iniciativ, které jsou zaměřeny na digitalizaci výroby, mezi nejdůležitější patří:

Německo: INDUSTRIE 4.0. Koncept Industrie 4.0 má silnou podporu vlády v Německu a rovněž je podporován hlavními průmyslovými asociacemi, akademickou sférou a Fraunhoferovým institutem.

Ostatní iniciativy mají k digitalizaci poněkud odlišný přístup a liší se také s ohledem na motivy svého založení a podpory ze strany vlády:

Francie: INDUSTRIE DU FUTUR

Itálie: FABRICA INTELLEGGENTE

USA: Industrial Internet Coalition, Advanced Manufacturing Partnership 2.0, Smart Manufacturing Leadership Coalition (pro Industrie 4.0 je vzorem/reakcí)

Čína: Made-in-China 2025

Japonsko: Robot Revolution Initiative, Industrial Value Chain Initiative

Rámec České republiky: Vláda ČR na svém zasedání dne 24. srpna 2016 schválila Iniciativu Průmysl 4.0, předloženou Ministerstvem průmyslu a obchodu, jejímž dlouhodobým cílem je udržet a posílit konkurence-schopnost České republiky v době masového nástupu tzv. čtvrté průmyslové revoluce ve světě.

Ministr průmyslu a obchodu Ing. Jan Mládek, CSc.: ... je zapotřebí aktuálně reagovat na vývojové trendy v technologiích i ve společnosti, spojené s digitalizací, a skloubit je s praxí. Proto jsme také v tomto kontextu materiál připravili.“ ... „Základem je aktivita podnikatelů, kteří se musí objektivnímu vývoji přizpůsobit jako první.“ [10, 11]

Tato iniciativa Průmysl 4.0 *je zaměřena na podporu:*

- investic a standardizace;
- aplikovaného výzkumu;
- rozvoje lidských zdrojů a dalšího vzdělávání;
- kybernetické bezpečnosti a příslušných právních úprav;
- uplatnění inovačních technologií v energetice;
- dopravy a Smart Cities (v Brně např. experimentálně Smart Nový Lískovec).

Aplikace připravených opatření budou *působit dvojím směrem:*

- *inovačním efektem* (nové generace výrobků) a
- *racionalizačním efektem* (změna výrobních prostředků a technologických procesů, tj. nový způsob výroby a další tím vynucené změny).

Přínosy pro firemní sféru v ČR: [10, 11]

- délka přechodného děje 10 až 15 (max. 20) let;
- úspora provozních a režijních nákladů v některých odvětvích až o 30 %;
- snížení nákladů na zpracování výrobků o 25 %;
- zvýšení produktivity práce o 30 %;
- řešení problému nedostatku pracovníků v řadě technických profesí;
- zvýšení flexibility a kvality výrobních procesů;
- snížení energetické a surovinové náročnosti;
- vznik nových výrobních a obchodních procesů.

Pro srovnání uvedme přínosy pro firemní sféru v SRN (podle Boston Consulting Group) [14]:

"Díky vyšší míře automatizace už nebudou potřeba někteří nejméně kvalifikovaní pracovníci, kteří vykonávají jednoduché a opakující se úkoly. Zároveň však budou potřeba vysoce kvalifikovaní zaměstnanci, kteří dokážou továrnu budoucnosti hlídat a řídit," uvádí analýza

Celkově by podle ní měla míra zaměstnanosti stoupnout – v příštích deseti letech o šest procent. Produktivita by tam měla stoupnout o pět až osm procent, přičemž u automobilek dokonce o deset až dvacet procent. [14]

5. Předpoklady, výzvy a dopady zavedení Průmyslu 4.0

Předpoklady zavedení Průmyslu 4.0

- dlouhá tradice průmyslové výroby, solidní technické schopnosti a vyspělost zaměstnanců;
- relativně příznivá úroveň inovační výkonnosti české ekonomiky mezi zeměmi střední a východní Evropy;
- kvalitní úroveň technického vzdělání.

Výzvy (slabá místa) zavedení Průmyslu 4.0

- nízké povědomí o Průmyslu 4.0, častá záměna za prostou digitalizaci;
- vysoká vázanost pracovních sil v kvalifikačně méně náročných výroбах a profesích;
- nízká připravenost vzdělávacích institucí;
- Evropa a ČR v globalizovaném světě (koncentrace a centralizace...).

Dopady zavedení Průmyslu 4.0 budou na:

- zaměstnanost,
- vzdělávání,
- infrastrukturu,
- bezpečnost (kybernetickou),

Společenské souvislosti

Předseda Českomoravské konfederace odborových svazů Josef Středula: "V České republice je ohroženo až čtyřicet procent pracovních příležitostí." [9]

Oborníci se domnívají, že čtvrtá průmyslová revoluce zvýší produktivitu práce až o jednu třetinu. To se bezesporu neobejde bez zániku řady pracovních míst, dost možná provázeného dočasnými sociálními otřesy. Zkušenosti z minulých průmyslových revolucí však dávají důvod k optimismu. Ještě v roce 1928, tedy dlouho po první i druhé průmyslové revoluci, pracovalo v zemědělství 35 procent obyvatel Československa. Byli jsme přitom vyspělou průmyslovou zemí, v mnoha státech byl podíl zemědělství na celkové zaměstnanosti ještě vyšší. Dnes pracují v zemědělství pouhá tři procenta obyvatel ČR. [9]

V průmyslu a stavebnictví dnes pracuje 38 procent lidí. Dnes nikdo neumí spolehlivě říct, co budou za patnáct a dvacet dělat všichni ti zaměstnanci, kteří dnes pracují ve výrobě. Díky předchozím průmyslovým revolucím věříme/předpokládáme, že zástupů dlouhodobě nezaměstnaných se obávat nemusíme (?).[9]

Řada lidí nalezne uplatnění v oborech, které dnes ještě neexistují. Uvádí se: vývojář mobilních aplikací, specialista na optimalizaci webových stránek pro vyhledávače nebo správce firemních profilů na sociálních sítích. Ovšem natáčení videí na YouTube nebo publikování fotografií na Instagramu nebude asi ani v budoucnu zaměstnání pro desetitisíce lidí. Uvidíme, jak na tom budou sportovní instruktoři, osobní trenéři, finanční poradci atd.

Předseda Asociace malých a středních podniků Karel Havlíček: „... samotná revoluce musí začít hlavně ve firmách. ... Pokud změna nebude vycházet přímo z nich, pak to nikdy nebude plnit účel. Firmy musí dospět k tomu, že to pro ně má význam. Od firem by směrem k vládě měly vzejít například požadavky na změnu zákonů. Bude-li to opačně, vytvoříme nejen legislativní zmetek, ale i umělé podnikatelské prostředí. ... Musíme se vyvarovat toho, jak vznikaly například technologické parky. Za miliardy jsme vytvořili centra, za další stamiliony se vybavila vším možným a pak se náročně sháněli nájemníci.“ [9]

Evropa a ČR v globalizovaném světě

ČR se musí do Průmyslu 4.0 zapojit, aby neztratila konkurenceschopnost, je dobře připravena + spolupráce s Německem, řešení pro Českou republiku v konkurenci se zbytkem světa.

Objevují se také námitky a poukázání na nevyjasněné souvislosti:

- Digitální revoluce je zatím spíše snem poskytovatelů připojení a softwarových firem.
- Přesun výroby z asijských zemí – zvýšení zaměstnanosti zde + snížení zaměstnanosti v Asii, může vzniknout krize a migrace.
- Řešení nezaměstnanosti – tzv. základní nepodmíněný příjem.
- Internet služeb a Internet věcí – velké nebezpečí pro soukromí člověka.
- Digitální ekonomika bez peněz, nesmí vzniknout nějaký zásadní problém v globální síti.

Inovace ve vztahu k vědě a technologii

Tradiční schéma: „myšlenka – základní výzkum – aplikovaný výzkum – průmyslový vývoj – inovovaný produkt“

Situace na začátku 21. století – Názor popularizátorů vědy a techniky, že inovace neplynou z vědy, ale z technologie. Dokonce se poměr obrací i ve vztahu vědy a technologie – věda je dcerou technologie.

Dílčí závěr: Inovace nemusí mít žádnou přímou souvislost s výzkumem, zejména tím základním.

Představa, že lze nalít dotační (státní) peníze do vědy, která je veřejným statkem, a z vědeckých ústavů budou plynule vycházet technologie a inovace, je jednostranná. Příklady: elektronová litografie, GaAs x Si,

„Nepřetržitě běžící stroj inovací nevděčí za svou existenci ani vědě (která z něj těží víc, než k němu přispívá), ani **penězům** (které nejsou vždy limitujícím faktorem), ani **patentům** (které často překážejí), ani **vládám** (které v inovacích vůbec nevynikají). Není to proces směřující shora dolů, je to spíše směna myšlenek a nápadů, co stojí u zrodu inovací.“ [4]

Vyspělá společnost se stává společností inovace a jenom trvalý technologický vývoj jí může zajistit budoucnost v tvrdé globální konkurenci. Odbornost a vynalézavost dnes vydělává mnohem více než v minulosti. Bohužel zjišťujeme, že není přímá korelace mezi vyšší vzdělaností a ekonomickou výkonností země.

6. Závěr

Prognóza do budoucnosti je optimistická, 4. průmyslová revoluce může v krátkém horizontu přinést užitečné výsledky.

Neexistuje žádný zázračný recept na prosperitu a úspěch.

ČR jako malý stát se nestane určujícím na poli elektroniky ani strojírenství, ale může získat přiměřený díl světové výroby a obchodu.

I nadále bude platit, že za úspěchem (za inovacemi) stojí znalosti, tradice a nadkritická masa lidských a materiálních zdrojů.

Univerzity mohou přispět především kvalitními absolventy a dále poznatky základního a aplikovaného výzkumu.

Univerzity mají velké rezervy v zapojení studentů magisterského stupně do výzkumu a vývoje, příliš spoléhají na akademické pracovníky a výzkumníky, kteří jsou přetížení.

Není naděje (politická vůle), že by strukturované studium (bakalář-magistr) zaniklo.

Musíme vyřešit profil bakaláře (v inženýrství) tak, aby byl použitelný pro praxi.

Motivovat absolventy gymnázií ke studiu na technických oborech (jak? maskulinizací profesorského sboru?).

7. Použitá literatura

- [1] *Paulinyi, A.: Průmyslová revoluce: o původu moderní techniky. Praha, 2002, ISBN 80-86642-02-X.*
- [2] *Purš, J.: Průmyslová revoluce v českých zemích. Praha, SNTL, 1960.*
- [3] *Purš, J.: Průmyslová revoluce: vývoj pojmu a koncepce. Praha, Academia, 1973.*
- [4] Ridley, M: Racionální optimista. Argo 2013, ISBN 978-80-7363-525-1
- [5] Bernal, J.D.: Science in history. Vol. 3. Natural sciences in our time. Penguin Books, 1965.
- [6] Mařík, V. a kol: Průmysl 4.0. Výzva pro Českou republiku. Management Press, 2016, ISBN 978-80-7261-440-0
- [7] Mařík, V.: Je Industry 4.0 opravdu revolucí? Presentace na cyber.felk.cvut.cz
- [8] Mařík, V.: Česká republika může na Industry 4.0 hodně vydělat. In: <https://www.businessinfo.cz/cs/clanky/vladimir-marik-ceska-republika-muze-na-industry-40-hodne-vydelat-73668.html>
- [9] <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/nova-prumyslova-revoluce-nezaspete-nastup-prace-40/r~97fa2490353311e593f4002590604f2e/?redirected=1478716876>
- [10] Průmysl 4.0. In: <http://www.ppp4.cz/prezentace/documents/pdf/prumysl-4-0-brozurka.pdf><http://www.prumysl.cz/prumysl-4-0-z-vladni-strany/>
- [11] Vláda ČR Schválila iniciativu průmysl 4.0. In: <http://www.prumysl.cz/vlada-cr-schvalila-iniciativu-prumysl-4-0/>
- [12] <http://www.businessinfo.cz/cs/clanky/strategie-evropa-2020-5155.html#!&chapter=1>
- [13] Honda vytiska auto. In: <https://www.novinky.cz/auto/417347-honda-vytiskla-auto.html>
- [14] Holanová, T.: Nová průmyslová revoluce. Nezaspěte nástup Práce 4.0 - Aktuálně.cz
- [15] Končí éra globalizace? Co bude dál? Inspirativní polemika ekonomů Zeleného a Zámečnicka. In: <http://hlidacipes.org/konci-era-globalizace-co-bude-dal-inspirativni-polemika-ekonomu-zeleneho-a-zamecnika/>
- [16] Zelený, M. – Košturiak, J.: Lokální výroba a služby. In: <http://www.milanzeleny.com/cs-CZ/stranky/1/-/0/432/lokalni-vyroba-a-sluzby>
- [17] Zelený, M.: Neprožíváme krizi, ale změnu ekonomického systému. In: http://ceskapozice.lidovky.cz/milan-zeleny-neprozivame-krizi-ale-zmenu-ekonomickeho-systemu-psz-/tema.aspx?c=A150717_123221_pozice-tema_lube
- [18] Auta budoucnosti se tisknou a létají. In: <https://www.novinky.cz/auto/407800-auta-budoucnosti-se-tisknou-a-letaji.html>
- [19] V Dubaji vyrostla první tištěná kancelářská budova. In: <https://www.novinky.cz/bydleni/tipy-a-trendy/404522-v-dubaji-vyrostla-prvni-tistena-kancelarska-budova.html>
- [20] http://www.businessinfo.cz/cs/clanky/unie-inovaci-3928.html?utm_source=portal&utm_medium=web&utm_campaign=clanky_souvisejici

ENERGY HARVESTING - GENERÁTORY ENERGIE S VYUŽITÍM ENERGIE OKOLNÍHO PROSTŘEDÍ

Miroslav Husák

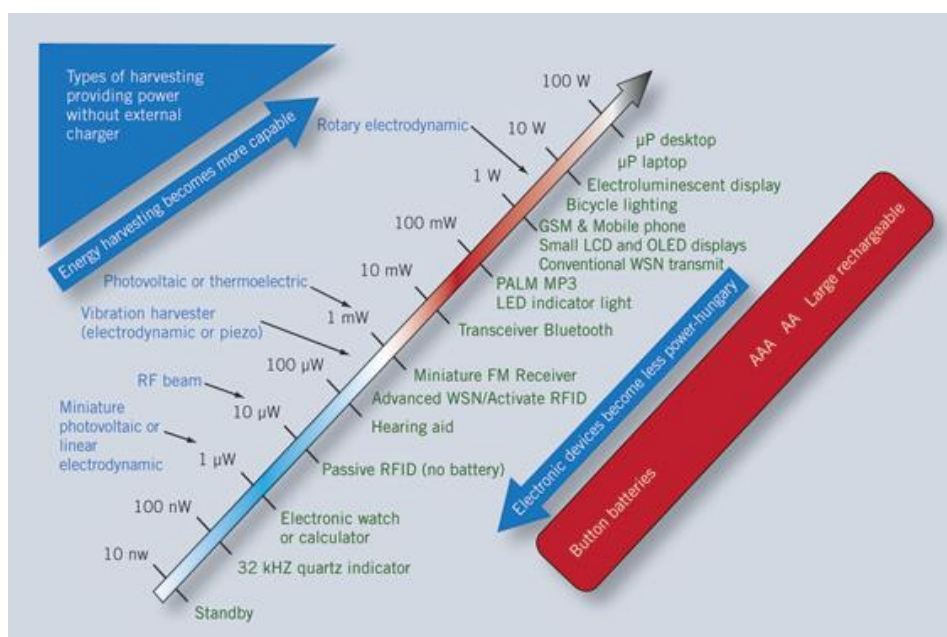
Katedra mikroelektroniky, fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze,
Technická 2, Praha 6

husak@fel.cvut.cz

Úvod [1]

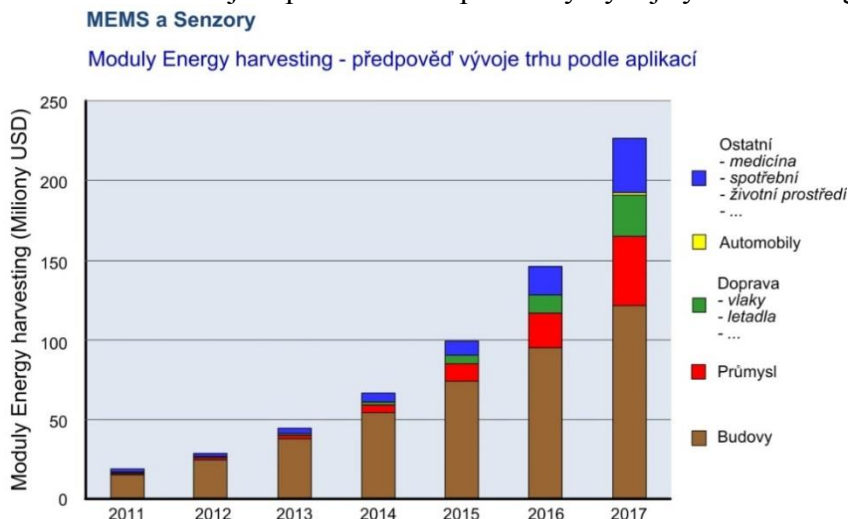
Moderní mikroelektronické součástky umožňují významné snížení napájecího příkonu i napětí, to vede k tomu, že v mnoha případech již zařízení nemusí být napájena z vnějšího napájecího zdroje, např. z baterií. V současné době jsou v praxi využívány různé technologie pro získávání elektrické energie z větru, z mořských vln, piezoelektrického principu, termoelektrického principu, mechanického pohybu apod. Vedle nejznámějších zdrojů energie pracujících na principu fotovoltaických článků, se pro malé napájecí příkony objevují i další principy přeměny okolní fyzikální energie na energii elektrickou. Pro tyto systémy se vžil označování „Energy harvesting“ (sklizeň energie). Okolní fyzikální prostředí (vítr, mořské vlny, sluneční záření, magnetismus, mechanický pohyb apod.) je v podstatě zásobníkem energie [1].

Na trhu se objevuje mnoho nových vysoce úsporných čipů s významnou redukcí elektrického napájecího příkonu. Na druhé straně systémy Energy harvesting zvyšují účinnost a praktické použití (např. využití termoelektrického principu pro získávání elektrické energie je možné v prostředí s rozdílem teploty několika °C). Na obr. 2 je znázorněno na jedné straně snižování příkonu elektronických čipů a na druhé straně rostoucí dosažitelné výkony zdrojů typu Energy harvesting [2].



Obr. 2 Snižování příkonu elektronických čipů a rostoucí dosažitelné výkony zdrojů typu Energy harvesting [2]

Uplatnění systémů Energy harvesting na trhu se rozšiřuje do všech oblastí, stavební aplikace jsou zdaleka nejdůležitějšími. Systémy Energy harvesting jsou používány v komerčních budovách, kde jsou instalovány velké sítě bezdrátových přepínačů (pro osvětlení) a senzorů (přítomnost, vlhkost apod.). Hlavními argumenty pro jejich rozšíření jsou především snížení obrovských nákladů na instalaci zařízení (žádné kabely) a jejich prakticky bezúdržbový provoz. Druhou klíčovou oblastí pro Energy harvesting jsou aplikace s bezdrátovými senzory, které se používají k monitorování stavu strojů a procesů. Předpovídaný vývoj systémů Energy



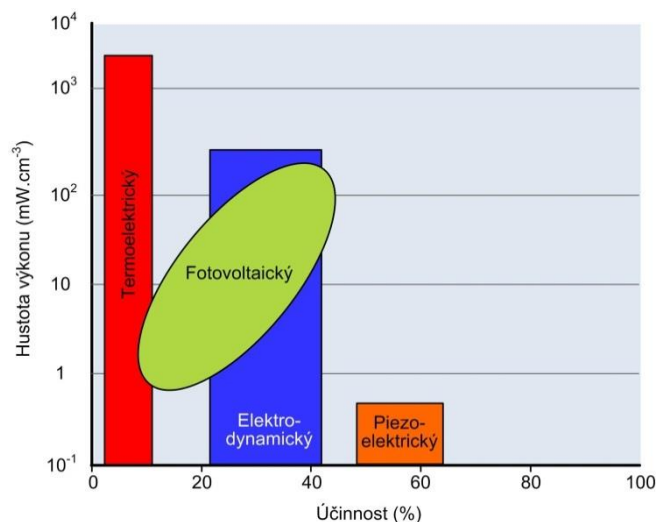
harvesting je na obr. 3 [3].

Říjen 2012

Obr. 3 Energy harvesting moduly do roku 2017 [3]

Energii na principu Energy harvesting lze získat z různých energetických zdrojů okolního prostředí, jako jsou mechanické vibrace, elektromagnetické zdroje, světlo, akustické, proudění vzduchu, teplo, změny teplot a další. Jedná se obecně o konverzi energie z okolí na využitelnou elektrickou energii. Při porovnání se zdroji energie uložené v běžných skladovacích prvcích, jako jsou baterie, kondenzátory, okolní fyzikální prostředí představuje relativně nekonečný zdroj dostupné energie. Na obr. 4 je uvedeno porovnání různých Energy harvesting principů.

Tab. 1 porovnává odhadovaný výkon a možnosti různých okolních zdrojů energie [5]. Hodnoty v tabulce byly odvozeny z publikovaných studií, provedených experimentů, teorie a informací dosažitelných v literatuře. Ačkoliv se jedná o orientační porovnání, poskytuje přehled možných metod zdrojů a ukládání energie s využitím různých okolních zdrojů energie. Světlo může být významným zdrojem energie, ale je velmi závislé na aplikaci a podmínkách činnosti napájeného systému. Tepelná energie je omezená, protože rozdíl teplot na čipu z principu bývá obvykle velmi malý. Energie otřesů náleží mezi středně velké zdroje energie, ale opět závisí na konkrétní aplikaci [6].



Obr. 4 Porovnání výkonové hustoty a účinnosti různých Energy harvesting systémů [4]

Tab. 1 Porovnání výkonové hustoty energie různých metod typu Energy harvesting [5]

Zdroj energie	Výkonová hustota
Akustický hluk	0,003 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$ 0,96 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$
Teplotní změna	10 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$
RF	1 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (GSM 900 MHz) 0,001 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Wi Fi)
Okolní světlo	100 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ (přímé slunce) 100 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (osvětlená místnost)
Termoelektrická energie	60 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ (člověk) 1 - 10 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ (průmysl)
Otřesy (mikrogenerátor)	4 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$ (pohyb člověka Hz) 800 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$ (stroj kHz)
Otřesy (piezoelektrický princip)	200 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-3}$
Proudění vzduchu	1 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$
Ztlačení tlačítka	50 $\mu\text{J}\cdot\text{N}$
Vložka v botě	330 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$
Ruční generátor	30 $\text{W}\cdot\text{kg}$
Nárazy v podpatku boty	7 $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$

Poznámka: Informace o získané energii konverzí fyzikální energie z okolního prostředí se liší, různé zdroje udávají různé hodnoty.

Zdroje energie z okolního prostředí [1]

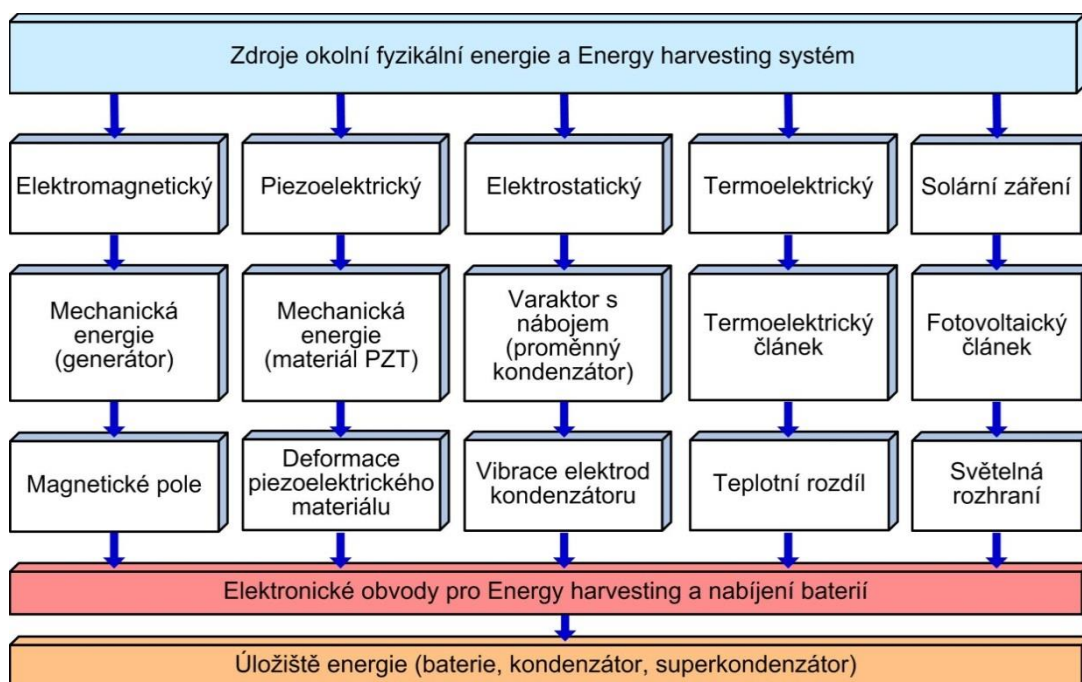
Proces Energy harvesting se skládá ze dvou hlavních aktivit, tj. získání energie vhodným převodem primární fyzikální energie na elektrickou a dále uskladněním získané elektrické energie ve vhodných elektronických obvodech nebo součástkách (baterie, kondenzátor). Obvykle se jedná o získávání energie pro napájení elektronických obvodů s malou spotřebou, jako jsou bezdrátové senzorové sítě, malá přenosná elektronická zařízení, popř. další autonomně napájené malé přístroje. Používané fyzikální zdroje jsou schopné dodávat energii kontinuálně nebo nárazově. V analýzách je dokázáno, že nelze využívat pouze jeden fyzikální zdroj, ale je nutné spojit různé typy zdrojů pro dostatečné zajištění napájení, výběr zdrojů je nutné realizovat podle příslušných aplikací, ale také podle podmínek v daném místě. V [5] je provedeno shrnutí základních charakteristik zdrojů energie - obr. 5 [4].

- Lidské tělo - mechanická a tepelná energie mohou být generovány z lidského nebo zvířecího těla akcemi, jako je chůze a běh.
- Přírodní energie - vítr, průtok vody, mořské vlny a solární energie jsou teoreticky neomezené zdroje energie v okolním prostředí.
- Mechanická energie - otřesy strojů, mechanické namáhání, mechanické napětí z vysokotlakých motorů, výrobních strojů a dalších.
- Tepelná energie - odpadní tepelná energie z pecí, ohřivačů a ze systémů, kde teplo vzniká třením.
- Světelná energie - vnitřní osvětlení v místnosti nebo venkovní sluneční energie.
- Elektromagnetická energie - tlumivky, cívky a transformátory jsou zdrojem vyzařované elektromagnetické energie do okolí nebo naopak mohou být využívány na principu Faradayova zákona jako zdroje energie.
- Chemické a biologické zdroje.
- Zdroje záření.



Obr. 5 Fyzikální zdroje energie pro Energy harvesting [4]

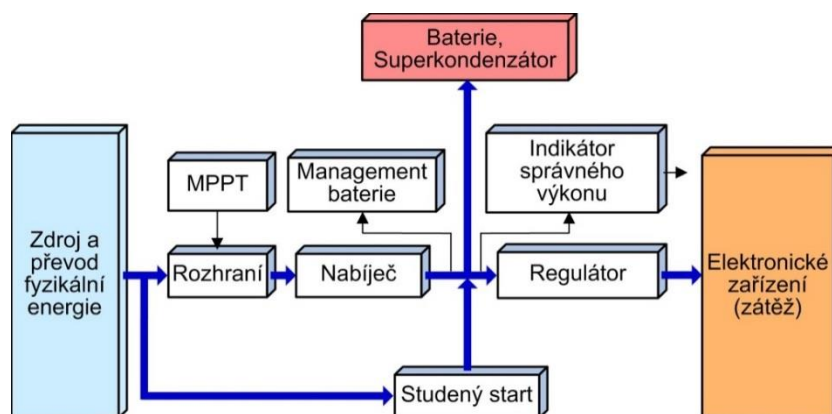
Na obr. 6 je uveden obecný přehled Energy harvesting systémů [5]. První řada zobrazuje základní primární fyzikální zdroje energie. Aktuální implementace a nástroje používané k převodu jsou uvedeny ve druhé řadě. Třetí řada ukazuje principy používané k přeměně energie z každého primárního energetického fyzikálního zdroje. Další řada ukazuje elektronické principy a obvody pro řešení uchování energie a nabíjení baterií, v poslední řadě jsou uvedeny elektronické prostředky pro uchování.



Obr. 6 Obecný přehled Energy harvesting systémů [5]

Funkce napájecího managementu Energy harvesting [1]

Okolní zdroje energie lze rozdělit na stejnosměrné (DC) zdroje a střídavé (AC) zdroje. DC zdroje jsou charakteristické velmi pomalými časovými změnami, typicky se jedná o intenzitu světla, teplotní gradient apod. AC zdroje využívají vibrace, RF výkon získaný z piezoelektrických materiálů, elektromagnetické generátory apod. Výstupní energie z těchto typů Energy harvesting musí být usměrněna tak, aby na výstupu byl DC výstupní výkon. Systém se skládá ze zdroje fyzikální energie (okolní prostředí), úložiště energie (superkondenzátor nebo baterie), zátěže a obvodů managementu napájení (PMIC-power management Integrated circuit).



Obr. 7 Blokové schéma obecného Energy harvesting systému

Vzhledem k tomu, fyzikální energie je časově proměnná a je závislá na různých podmínkách prostředí, je vytvořená energie ukládána v energetické vyrovnávací paměti (baterie, superkondenzátor). Zátěž je napájena z této energetické vyrovnávací paměti, proto systém může pracovat i v případě, že není k dispozici okolní fyzikální energie. Jednotka managementu napájení se skládá z DC/DC měniče s optimalizovaným rozhraním k vnějšímu zdroji okolní energie, obvodu managementu baterie, výstupního regulátoru a jednotky studeného startu. Na obr. 7 je znázorněna obecná architektura systému Energy harvesting.

Mechanické systémy Energy harvesting [1]

Příkladem generování elektrické energie pomocí rotačního pohybu je kolečko bezdrátové PC myši. Systém je navržen pro ultranízky příkon bezdrátového rozhraní pro komunikaci na malou vzdálenost, jako je např. bezdrátová myš bez baterie. Systém byl navržen pro využití rotačního pohybu kolečka myši s převodem na elektrickou energii. Elektrický generátor je napájen při otáčení kolečka tak jako při tažení myši po podložce. Získaná energie je určena pro napájení elektronického systému myši s ultra nízkým příkonem RF vysílače a mikrokontroléru. Experimentální výsledky ukázaly, že myš pro provoz potřebuje příkon 2,2 mW, získaná energie navrženého systému je větší než 3 mW, což je dostatečné pro komunikaci myši v rozsahu jednoho metru [7].

Dalším příkladem využití mechanické energie je elektretový elektrostatický mikro generátor. MEMS elektrostatický měnič obsahuje na vibrace citlivý kondenzátor polarizovaný elektretem. Realizovaný obecný multidoménový model je schopný vyrobit energii až $50 \mu\text{W} \cdot 0,1 \text{ cm}^{-2}$ [8].

Mechanismy využívající otřesy.

Vnitřní prostředí může mít spolehlivé zdroje stálých mechanických otřesů vhodných pro generování elektrické energie. Systémy pracující s tímto principem Energy harvesting mohou využívat elektromechanický nebo piezoelektrický převod. Energie získaná z otřesů je založena na relativním pohybu hmoty zavěšené na pružině vůči pevnému rámu. Mechanické zrychlení je vytvořeno otřesy, které způsobuje kmitání zavěšené hmotné části. Tlumičí energie může být použita na přeměnu na elektrickou energii prostřednictvím magnetického pole (elektromagnetické), napětí na elektrodách piezoelektrického materiálu (piezoelektrické) nebo elektrického pole (elektrostatické).

Elektromagnetický princip.

Cívka připojena k oscilační hmotě se pohybuje v magnetickém poli vytvořeném pevným magnetem. Na cívce procházející magnetickým polem se podle Faradayova zákona indukuje napětí, které je však ve své podstatě malé, resp. velikost energie dosažené tímto převodem je malá. Je proto nutné dosahované hodnoty zvětšit, aby energie na výstupu byla schopna napájet elektronické obvody. K tomu je možné použít transformátor, zvýšit frekvenci kmitání cívky v magnetickém poli nebo zvýšit magnetické pole pevného magnetu. Nicméně každý z těchto parametrů má svá omezení daná velikostí mikročipu, materiálovými vlastnostmi nebo konstrukcí.

Piezoelektrický princip.

K přeměně mechanické energie na elektrickou se využívá piezoelektrických vlastností vhodných materiálů (PZT, polymery, apod.). Oscilační systém může mít různý tvar, typicky se jedná o strukturu vetknutého nosníku, kde na jeho konci je umístěna setrvačná hmota způsobující ohýbání nosníku při působení mechanické energie. Vytvořené napětí na polepech piezoelektrického materiálu je časově proměnné a amplituda se mění úměrně působení velikosti mechanické energie. Piezoelektrický princip přeměny mechanické energie na elektrickou vytváří relativně vyšší napětí a hustotu energie než je dosaženo u elektromagnetického systému. Mezi typické aplikace lze zařadit piezoelektrický zapalovač plynu.

Elektrostatický princip.

Metoda využívá proměnnou kapacitu kondenzátoru způsobenou změnou geometrie desek (elektrod) působením mechanických otřesů. Konstantní napětí nebo konstantní proud se dosáhne konverzí s využitím dvou různých mechanismů. Velkou výhodou metod je kompatibilita s technologiemi výroby integrovaných obvodů. MEMS proměnné kondenzátory mají velmi malé ztráty a jsou dnes dosti dobře výrobně dostupné, jsou schopné generovat vyšší úroveň výstupního napětí se střední hustotou výkonu v porovnání s elektromagnetickými metodami. V tab. 2 je uvedeno porovnání tří různých konverzních principů energie získané z mechanických otřesů (elektrostatické, elektromagnetické a piezoelektrické) [9].

Tab. 2 Porovnání tří různých konverzních principů energie získané z mechanických otřesů

	Elektrostatický	Elektromagnetický	Piezoelektrický
Komplexnost konverzního procesu	Malá	Velmi vysoká	Vysoká
Hustota energie	4 mJ.cm ⁻³	24,8 mJ.cm ⁻³	35,4 mJ.cm ⁻³
Geometrické rozměry	Integrované	Makro	Střední/makro
Problémy	Velmi vysokého napětí a potřeba přídavného zdroje náboje	Velmi nízké výstupní napětí	Nízké výstupní napětí

Tepelné systémy Energy harvesting. [1]**Termoelektrický princip.**

Teplotní gradienty v okolním prostředí mohou být využívány přímo k přeměně na elektrickou energii, přeměna je založena na principu Seebeckova jevu. Termoelektrické články z n a p-typu materiálů vytvářejí termoelektrické baterie, s výhodou pro omezení šíření tepla se k jejich konstrukci využívají teplotně izolované MEMS struktury. Ukazuje se, že k výrobě použitelné úrovně napětí a výkonu jsou nutné velké teplotní gradienty. Avšak teplotní rozdíly větší než 10 °C je na mikrosystémové struktuře obtížné získat, a proto tyto systémy mají na výstupu nízké napětí a malý výkon. Typicky je termoelektrická baterie s 10 přechody schopná vytvořit výkon 15 μW.cm⁻³/°C [10], výkon se však s rozvojem MEMS technologií zvyšuje.

Podle [11] byla navržena baterie termoelektrických článků s velmi malými a tenkými termoelektrickými články, která může využívat velmi malé teplotní rozdíly (> 2 °C), které se přirozeně vyskytují v okolním prostředí na rozhraní země/vzduch/ voda, popř. na rozhraní kůže/vzduch. V závislosti na teplotním gradientu je tento termoelektrický systém schopný generovat elektrický výkon od μW až do stovek mW. Předpokládané aplikace jsou určeny pro využití v automobilech, vojenských aplikacích, bezpečnostních aplikacích, biomedicíně, zemědělství, sledování přírody apod.

Komerční produkt využívající termoelektrický princip s výstupním výkonem 40 mW při teplotním gradientu 5 °C a s plochou 0,5 cm² a tloušťkou několik mm [11]. Toto zařízení generuje výstupní napětí 1 V, které může být použito pro napájení nízko-příkonových elektronických systémů. Objevují se i jiné převody tepelné energie na elektrický signál, např. princip elektrického generátoru s tepelnou expanzí [12].

Pyroelektrický princip.

Pyroelektrický jev umožňuje převod teplotní změny na elektrické napětí nebo proud. Pyroelektrický jev je schopnost některých materiálů generovat elektrické napětí, pokud jsou materiály ohřívány nebo ochlazovány. V důsledku změny teploty kladné a záporné náboje se přesunou na opačný konec materiálu prostřednictvím jevu polarizované migrace. Aplikace pyroelektrického jevu pro Energy harvesting vyžadují časově proměnný vstup teploty, výstup je představován časově proměnným malým elektrickým výkonem struktury. Jednou z hlavních výhod využití pyroelektrického principu je, že většina pyroelektrických materiálů a z nich realizovaných struktur je stabilní do 1200 °C nebo i teploty vyšší. Stabilita umožňuje získávání energie z vysokoteplotních zdrojů, kde je vyšší termodynamická účinnost.

Světelná energie (solární energie) Energy harvesting

V současné době se jedná pravděpodobně o nejvíce využívanou energii pro výrobu elektrické energie typu Energy harvesting. Využívají se fotovoltaické články. 3D Si struktury zvyšují efektivitu. Realizované elektronické systémy s obvody plně kompatibilními se současnými technologiemi výroby integrovaných obvodů umožňují získání vyšších elektrických výkonů v porovnání s ostatními zdroji Energy harvesting. Výstupní výkon je i v tomto případě silně závislý na podmínkách prostředí a je prakticky vždy silně kolísavý.

Energie akustického signálu Energy harvesting

Akustický hluk je výsledkem tlakové vlny vytvořené mechanickým zdrojem vibrací. Lidské ucho detekuje a převádí tlakové vlny na elektrické signály. Obecně sinusová vlna se označuje jako tón, kombinace několika tónů se nazývá zvuk a nepravidelné vibrace se označují jako hluk. Akustický výkon je celkové množství zvukové energie vyzařované zdrojem zvuku v daném čase, a to je obvykle vyjádřeno ve wattech. Reference akustického tlaku je práh slyšitelnosti lidského ucha 20 μPa. Měrná jednotka sloužící k vyjádření relativní úrovně zvuku je Bel. Ukazuje se, že využití hluku jako zdroje energie v běžném prostředí je nevhodné s výjimkou velmi vzácně se vyskytujících prostředí s extrémně vysokou hladinou hluku. Generátory produkují na výstupu příliš malou úroveň výstupního výkonu.

Energie člověka Energy harvesting

Využití energie člověka k výrobě elektrické energie bylo již na počátku 20. Století. Baterky nebo radia na kličku jsou známá dlouho, v poslední době je řada známých principů v souvislosti s Energy harvesting opět obnovována. Dálkové ovládání bez baterií pro televizory Zenith, tzv. Space Commander“ vznikl již v roce 1956. Systém se skládal ze sady tlačítek sloužících ke generování ultrazvuku. Ultrazvuková energie byla v televizi dekodována, bylo možné přepínat kanály a ovládat hlasitost. Systém byl později nahrazen infračerveným ovládáním.

Spotřeba energie průměrného člověka je přibližně 10,5 MJ za den, to odpovídá cca 121 W ztrátového výkonu. Ztrátový výkon umožňuje vykonávání různých pohybů a činností lidskému tělu, nabízí se možnost využití části těchto úkonů. V MIT vyvinuli systém zdroje energie typu Energy harvesting, kde mechanismus je umístěn do podpatku boty a energie

se generuje při chůzi nebo běhu. Jsou vyráběny vložky do bot se zabudovaným piezoelektrickým Energy harvesting s výstupním výkonem až $330 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Výzkum je zaměřený i na princip bezdrátového transportu energie z bot do místa aplikace elektronického zařízení. Druhá skupina generátorů Energy harvesting využívá lidské činnosti směřované přímo na výrobu energie, viz. princip klíčkových bateriek nebo napájení rádia. Ukázka zdrojů energie generované lidskými aktivitami je na obr. 8 [13].



Obr. 8 Zdroje energie generované lidskými aktivitami [13]

Lidská chůze bude brzo napájet kapesní elektronická zařízení. Technologie reversního elektro zvlhčování jako dalšího možného zdroje Energy harvesting slibuje přeměnit mechanickou energii na elektrickou energii pomocí mikrofluidních zařízení skládajících se z tisíců tekutých mikrokapiček interagujících s novým nano-strukturovaným substrátem. Technologie by mohla zachytit energii vyrobenou lidmi při chůzi až do výše 20 W, která je běžně ztracena a ve formě tepla odvedena. Na rozdíl od tradičních baterií, Energy harvesting systém není třeba dobíjet, protože nová energie neustále vzniká při běžné chůzi.



Obr. 9 Bota se zdrojem energie typu Energy harvesting [14]

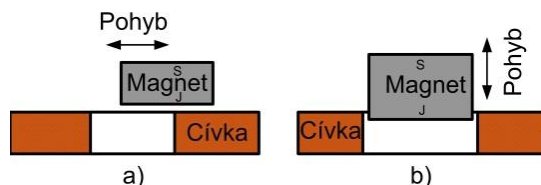
Předpokládá se využití takto získané energie pro napájení různých zařízení, od inteligentních telefonů, notebooků, rádií, GPS jednotek, brýle pro noční vidění, bateriek a dalších. Na obr. 9 je principiální náčrt uvedené boty [14].

Elektromagnetický princip je další fyzikální jev využívaný při generování elektrické energie, na obr. 1 je uvedený jako jeden z několika významných fyzikálních principů [1]. Jedná se o přeměnu mechanických vibrací na elektrickou energii s využitím tlumící energie a magnetického pole (elektromagnetický princip). Elektromagnetické systémy pro generování elektrické energie z okolního prostředí využívají seismické kmitající hmoty buzené vibracemi

připojené k mikrocívce pohybující se v magnetickém poli permanentního magnetu. V cívce se podle Faradayova zákona indukuje napětí o velikosti daném velikostí magnetického toku a dalšími parametry obvodu, materiálu a konstrukce. Výhodou elektromagnetických generátorů je, že jsou uzavřené a mohou být chráněny před vlivy vnějšího prostředí, jsou spolehlivé, mají malé mechanického tlumení, protože jednotlivé části se nedotýkají (ztráty třením), nemusí používat pomocné zdroje jako např. napětí. Nevýhodou elektromagnetických generátorů je relativně velký objem (velké geometrické rozměry), velmi obtížná integrace s technologiemi MEMS a velmi malé získané napětí (standardně menší než 0,1 V, výjimečně do 1 V), zatímco elektrostatické a piezoelektrické generátory produkují napětí v rozsahu od 2 do 10 V. Výhodou je i jejich obecně velmi dobrá dostupnost v mnoha aplikačních oblastech. Hustota získané energie je střední až relativně velká,

Elektromagnetické generátory - princip činnosti [15]

Z hlediska vzájemného pohybu cívky a magnetu existují obecně dva typy generátorů elektromagnetické energie. Prvním typem na obr. 10a) je planární pohyb mezi magnetem a cívkou. Magnetické pole procházející cívkou se mění v závislosti na relativním pohybu mezi magnetem a cívkou. U druhého typu na obr. 10b) se magnet vůči cívce pohybuje ve vertikálním směru. Magnetické pole procházející cívkou se mění se vzdáleností mezi cívkou a magnetem. V praxi se více využívá první typ, protože poskytuje lepší elektromagnetickou vazbu.



Obr. 10 Dva typy relativního pohybu magnetu a cívky, a) planární (horizontální), b) prostorový (vertikální)

Základní princip činnosti je založený na Faradayově zákonu elektromagnetické indukce z roku 1831 reprezentovaný rovnicí

$$u(t) = -N \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

kde u je časově proměnné indukované napětí, N je počet závitů cívky, φ je magnetický tok jedním závitem cívky, Φ je celkový magnetický tok cívkou a t je čas.

Základním hlediskem při navrhování elektromagnetického generátoru typu harvester jsou vlastnosti cívky. Počet závitů cívky a odpor cívky jsou důležité parametry pro určení napětí a užitečného elektrického výkonu. Geometrie cívky je určena počtem závitů, průměrem drátu a hustotou vinutí. Izolace závitů snižuje faktor plnění. Většina cívek je nemá vinutí dráty přesně u sebe, každá vrstva nemusí být zcela vyplněna. Faktor plnění cívek bude lišit, 50-60 %, u ortogonálního vinutí může faktor plnění dosáhnout hodnoty až 78 %, největší hodnoty až 90 % se dosahuje ortogonálně cyklickým vinutím [14].

Mikrocívky jsou vyráběné fotolitografií na substrátech (např. křemík) nebo na PCB. Mikrocívky realizované naskládáním planárních cívek, přičemž layout každé vrstvy je obvykle čtverce nebo kruhová spirála. Technologie používaná pro výrobu spirálové cívky obecně limituje tloušťku vodiče a minimální vzdálenost mezi jednotlivými cívkami. Proto minimální rozměry jednotlivých závitů závisí na použité výrobní technologii. Jako příklad lze uvést standardní PCB technologii, kde vzdálenost mezi závity musí být větší než 150 μm pro tloušťku vodiče 35 μm , přičemž vhodnou mikroelektronickou technologií může být dosaženo na křemíku vzdálenost 1-2 μm mezi závity pro typickou tloušťku vodiče 1 μm .

Pro tyto technologie výroby cívek na křemíku se může minimální vzdálenost rovnat tloušťce vodiče, i když pokročilejší mikrosystémové technologie umožňují realizovat mezi tloušťkou vodiče a minimální vzdáleností poměr až 10 [14].

Základem elektromagnetického generátoru je magnetický obvod, kterým prochází magnetické permanentního magnetu. Magnetické pole může být vytvořeno též elektromagnety, ale to vyžaduje průtok proudu a tím i spotřebu energie. V miniaturních zařízeních typu Energy harvesting není toto řešení vhodné. Permanentní magnety jsou vyrobeny z feromagnetického nebo feritového materiálu (ferit). Ferity jsou pro řešení generátorů zajímavé, protože jejich elektrický odpor je obvykle vyšší než u feromagnetického materiálu, a proto vířivé účinky magnetického pole jsou nižší.

Tyto materiály mohou být magnetizovány magnetickým polem. Některé materiály jsou tzv. *měkké*, což znamená, že mohou být snadno zmagnetizovány a též snadno demagnetizovány (např. vibracemi). *Tvrdé* magnetické materiály vyžadují větší magnetizační pole a obtížněji se demagnetují. Magnety mohou vykazovat různé stupně magnetizace v závislosti na koercitivní síle magnetizačního pole.

Další parametr u feromagnetických materiálů je Curierova teplota (**Curieův bod**), charakteristická vlastnost feromagnetických a piezoelektrických látek popsána francouzským fyzikem Pierre Curie. Nad Curieovou teplotou ztrácí materiál své feromagnetické nebo piezoelektrické vlastnosti.

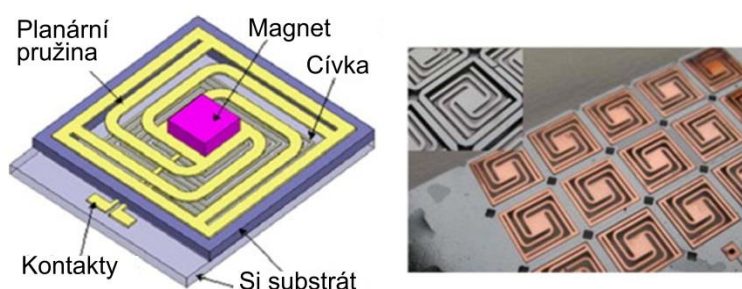
Fyzikální princip vychází ze skutečnosti, že ve feromagnetické látce jsou elementární dipóly uspořádány do domén, domény svým uspořádáním tvoří vlastní magnetické pole příslušného materiálu, tzv. magnetizaci. Při teplotě vyšší než Curieova je pravidelné uspořádání domén chaoticky narušeno, při tomto rozložení magnetických momentů již látka nevykazuje feromagnetické vlastnosti. Ke změně dochází skokově (analogicky se změnou skupenství, jde o příklad fázového přechodu), např. železo má Curieovu teplotu 768 °C. U feroelektrických materiálů se objevuje podobný jev, kdy při feroelektrické Curieově teplotě mizí spontánní uspořádanost elektrických dipólů feroelektrika.

Mezi typické materiály pro permanentní magnety náleží Alnico, keramika (feritové), samarium kobalt (SmCo) a slitina neodym-železo-bór (NdFeB). Alnico (rok 1940) je slitina hliníku, niklu, kobaltu, mědi, železa a titanu. Je stabilní při teplotě a může být použit v aplikacích s vysokými teplotami (až ~ 550 °C). Keramické nebo tvrdé feritové magnety (rok 1950) jsou široce používány vzhledem k jejich nízké ceně. Jsou tvrdé, křehké, jsou k dispozici v celé řadě složení prvků, jako např. železo a baryum (BaFe_2O_3) nebo oxidy stroncia (SrFe_2O_3). Tyto materiály se smísí v práškové formě, potom jsou stlačeny do forem a spékány. Samarium-kobalt (SmCo) je komerčně používaný materiál k výrobě magnetů od roku 1970 a neodym-železo-bór (NdFeB) od roku 1980. Jsou známé jako magnety vzácných zemin, protože se skládají z materiálů lanthanoidů náležející ke skupině prvků vzácných zemin. Oba typy vykazují mnohem vyšší magnetické pole než AlNiCo nebo keramické materiály. SmCo - jsou magnety složené ze samaria a kobaltu a patří mezi extrémně silné permanentní magnety. Hlavní předností SmCo magnetů je jejich dobrá tepelná stabilita, maximální pracovní teplota kolem 300 °C, jsou přirozeně odolné proti korozi. Nejlepší magnetické vlastnosti vykazuje NdFeB, slinované NdFeB magnety jsou vyráběny spékáním ze směsi vzácných zemin neodym-železo-bór. Tento materiál je však možné použít při nízkých pracovních teplotách, má špatnou korozní odolnost. Neodymové magnety se řadí k nejučinnějším magnetům s vynikajícími magnetickými vlastnostmi (remanence a energetická hustota). Náleží k řadě magnetických materiálů založených na bázi vzácných zemin (lanthanoidy). Jejich hlavní složkou je železo (Fe) s příměsí neodymu (Nd) a bóru (B). Další prvky přidávané do slitiny jsou hlavně kobalt (Co), dysprosium (Dy), příměsí

vylepšují magnetické vlastnosti (remanence, koerzivní síla) a maximální pracovní teplotu. Při vysoké vlhkosti vzduchu oxidují, a proto se pro ochranu proti oxidaci galvanizují nejčastěji zinkem nebo niklem, popř. se na povrch nanáší zlato, chrom, epoxid, pasivace, mezi nejnovější technologie patří ochrana povrchu hliníkem a nitridem titánu. Neodymové magnety se nejčastěji komerčně vytvářejí v anizotropním provedení, nejvyšší pracovní teplota je 60 °C až 240 °C v závislosti na třídě materiálu.

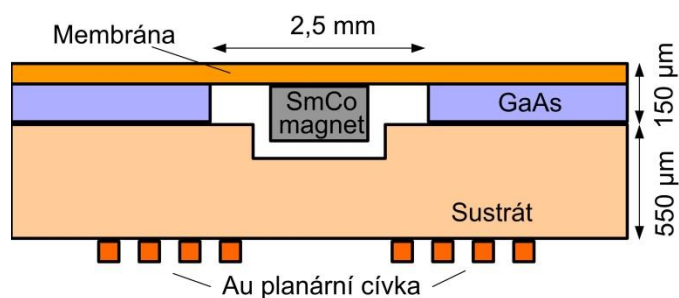
Pro realizaci Energy harvesting elektromagnetických systémů se volí právě tyto NdFeB magnety, protože generátorový systém se poměrně snadno chrání před okolními vlivy (oxidace).

Cívka může být vyrobena v rovině, tzv. planární cívka a to buď vinutím nebo mikrosystémovou technologií povrchového mikroobrábění na čipu. Na čipu lze vytvořit i pružiny držící seismickou hmotu a v současnosti i mikromagnet. Na obr. 11 je uvedeno typické uspořádání planární cívky umístěné pod pružinou, na které je umístěný magnet.



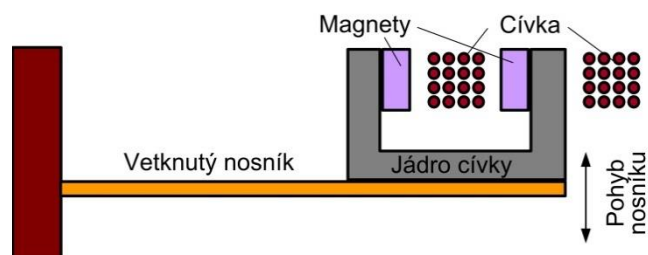
Obr. 11 Planární provedení elektromagnetického mikrogenerátoru, a) uspořádání cívky, pružiny a magnetu, b) fotografie mikrogenerátoru na čipu

Na obr. 12 je elektromagnetický generátor tvořený seismickou hmotou s magnetem m a pružinou k [16]. Při vibracích generátoru se hmotnost pohybuje mimo fázi s pouzdem generátoru, takže je tam pohyb mezi hmotností a pouzdem. Předpokládá se, že toto relativní posunutí má sinusový charakter a může být řídicím signálem pro vhodný elektromagnetický převodník pro generování elektrické energie. Převodník je popsán jako tlumič d , protože při přeměně mechanické energie na elektrickou energii se tlumí vibrace. Strukturu generátoru tvoří dvě části. Horní GaAs s pružinou a seismickou hmotou, dolní část s integrovanou planární cívkou. Seismická hmota je tvořena vertikálně polarizovaným SmCo magnetem 1 mm x 1 mm x 0,3 mm o hmotnosti $2,4 \cdot 10^{-3}$ Kg, který je připevněn k 7 μm silné polyamidové kruhové membráně, která vytváří pružinový element. Planární cívka na spodní straně je vytvořena 2,5 μm silnou Au vrstvou se 13 závitů. Geometrické rozměry generátoru jsou 5 mm x 5 mm x 1 mm. Typické parametry generátoru jsou 1 μW pro budicí frekvenci 70 Hz a 100 μW pro 330 Hz [17].



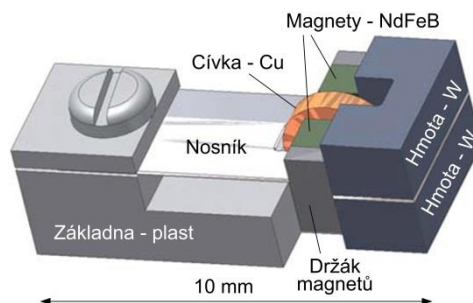
Obr. 12 Řez elektromagnetickým generátorem [17]

Na obr. 13 je elektromagnetický generátor elektrické energie s nosníkem (pružina) připevněným na jednom konci a na druhém volném konci nesoucí dvojici magnetů NdFeB (seismická hmota) na C jádru je popsán v [15]. Cívka má mnoho závitů ze smaltovaného měděného drátu a je upevněna mezi póly magnetů. Generátor má výstupní výkon 1 mW při objemu 240 mm³ při frekvenci mechanického buzení 320 Hz.

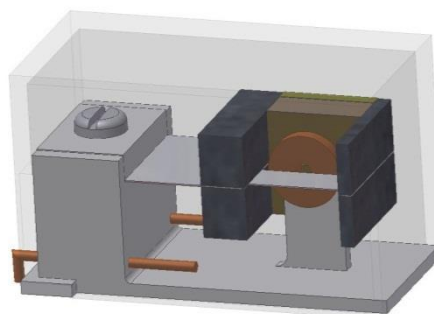


Obr. 13 Elektromagnetický generátor [15]

Na obr. 14 je uvedený příklad koncepce a řešení elektromagnetického generátoru s objemem menším než 1 cm³ a výkonem řádu desítek μW realizovaným mikroobráběním [18]. Pohybující se magnety umístěné na nosníku generují v cívce elektrický proud. Cívka je vinuta z drátu o průměru 12 μm s 2800 závitů, vnější průměr je 2,8 mm, tloušťka 0,5 mm. Z generátoru s optimalizovaným magnetickým obvodem lze získat efektivní hodnotu napětí 0,7 V a k tomu odpovídající výstupní výkon vyšší než 55 μW při budící mechanické frekvenci 50 Hz a zrychlení asi 0,6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$. Podle porovnání je tento generátor elektrické energie desetkrát účinnější než dosud známé typy generátorů a dále velkou výhodou je, že navržený generátor lze vyrábět mikrosystémovými MEMS technologiemi. Předpokládá se, že by mohl být použit pro široké aplikace, jako např. pro napájení bezdrátových senzorů, v asistenčních systémech sledování tlaku v pneumatikách, napájení kardiostimulátorů apod.



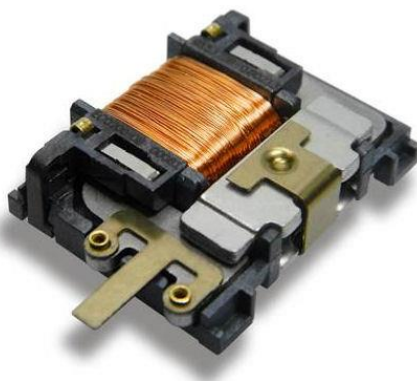
a)



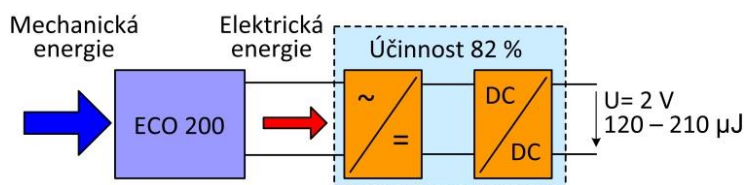
b)

Obr. 14 Elektromagnetický generátor realizovaný mikroobráběním, a) struktura, b) řez [18]

Příkladem komerčně vyráběného Energy harvesting systému je Energy harvester ECO 200 firmy EnOcean - obr. 15 [19]. Jedná se o elektromagnetický generátor určený pro lineární působení mechanické síly. Uplatňuje se především ve spojení s bezdrátovým vysílačem v miniaturizovaných přepínačích a senzorech v technologii inteligentních budov a průmyslové automatizaci. Výrobek je chráněn několika patenty (EP 1389358, US 7391135, US2006/0091984 A1). Geometrické rozměry jsou 29,3 mm x 19,5 mm x 7 mm, působící síla 2,7 - 3,9 N při výchylce 1,2 mm, výstupní energie 120 - 210 μJ při 2 V. Pro vyhodnocování se používá zapojení na obr. 16 [19].



Obr. 15 Komerční provedení elektromagnetického generátoru ECO 200 firmy EnOcean [19]



Obr. 16 Blokové zapojení systému s ECO 200 firmy EnOcean [19]

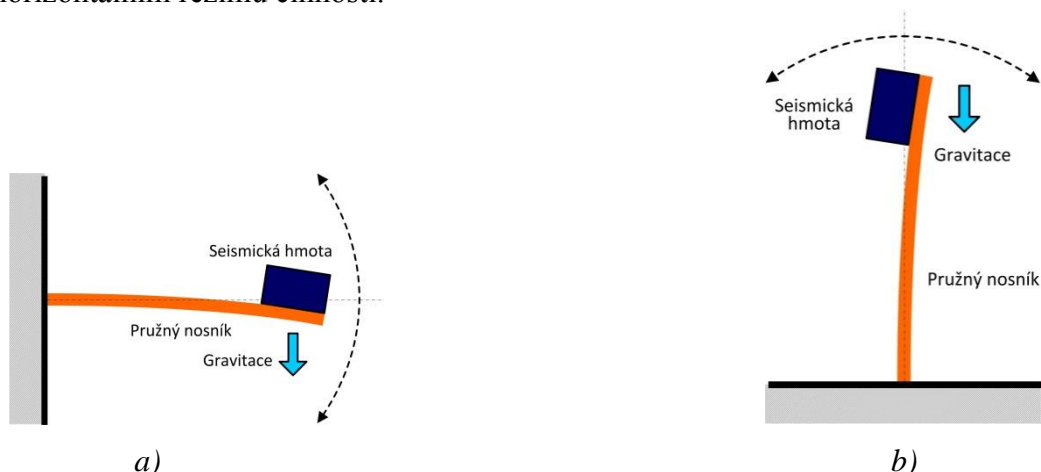
Mikronapájecí zdroje s piezoelektrickým principem [20]

Pro piezoelektrické generátory EH se používají různé elektronické struktury s různými piezoelektrickými materiály. Nejčastěji je používána struktura jednostranně vetknutého nosníku, můstková struktury používaná často v bistabilním režimu, membránové, tlakové, struktury pro získávání energie z nárazu, miniaturizované MEMS struktury a dokonce i nanostruktury, existuje velké množství různých modifikací

a) Piezoelektrické generátory s nosníkem buzené mechanickými vibracemi

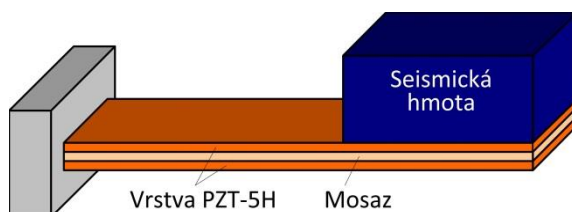
V současnosti nejčastěji využívaná struktura jak ve standardním provedení tak i v mikroprovedení. Struktura je navržena pro činnost v ohybovém módu, namáhání piezoelektrických vrstev generuje energii s využitím d_{31} efektu. Nosník umožňuje využití nízké rezonanční frekvence, další snížení je realizováno přidáním hmotnosti na konec nosníku, umožňuje generování energie při malém objemu struktury a vysokém mechanickém namáhání piezoelektrických vrstev. Nosníkový generátor je vytvořený z nosného materiálu pokrytého na jedné nebo na obou stranách vrstvou piezoelektrického materiálu (např. PZT) s elektrickými elektrodami. Mechanickým namáháním dochází k ohýbání nosníku (jedna

strana je namáhaná na tah a druhá na tlak) – obr. 17. Nosník může pracovat ve vertikálním nebo horizontálním režimu činnosti.



Obr. 17 Struktura vetknutého nosníku, a) vertikální ohyb, b) horizontální ohyb

Další kompozitní piezoelektrický generátor s nosníkovou strukturou má konstantní šířku, zjednodušuje vytvoření analytického modelu a dále i výrobní proces, ale použitá geometrie způsobuje nerovnoměrné rozdělení mechanického napětí podél osy nosníku. Prototyp generátoru byl vyroben vytvořením PZT vrstvy podložka na každé straně ocelového nosníku. Krychlová geometrie setrvačné hmoty byla realizována ze slitiny Sn a Bi na konci nosníku tak, aby generátor byl laděný na rezonanční kmitočet 120 Hz. Generátor vytvořil výstupní elektrický výkon téměř $80 \mu\text{W}$ do zátěže $250 \text{ k}\Omega$ se vstupním zrychlením $2,5 \text{ ms}^{-2}$. Generátor byl modifikován, byla použita tloušťka mosazeného nosníku $0,1 \text{ mm}$ – obr. 18. Modifikované provedení generátoru s tloušťkou $0,28 \text{ mm}$ PZT vrstvy, délkou nosníku 11 mm a seismickou hmotou s rozměry $17 \times 7,7 \times 3,6 \text{ mm}$ bylo schopno dosáhnout výstupního výkonu $375 \mu\text{W}$ při vstupním zrychlení $2,5 \text{ ms}^{-2}$ a frekvenci 120 Hz . Generátor byl využit pro napájení rádiového vysílače [20], [21].



Obr. 18 Uspořádání piezoelektrického generátoru s nosníkem [20], [21]

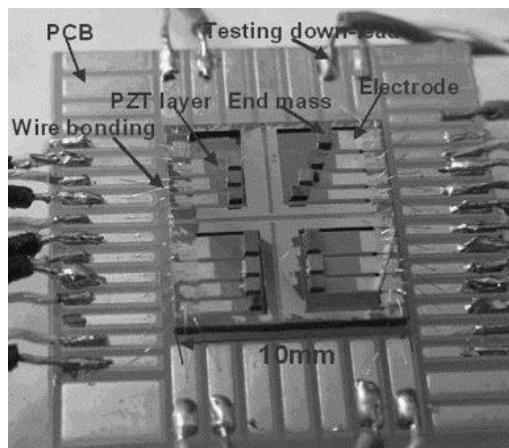
Firma Mide Technology Corporation dodává na trh generátorové systémy s bimorfním nosníkem a setrvačnou hmotou na konci nosníku, systém s geometrickými rozměry $90 \times 42,5 \times 9,75 \text{ mm}$ dodávající elektrický výkon $0,55 \text{ mW}$ při vibracích 113 Hz a zrychlení 1 g je uveden na obr. 19a) [22].



Obr. 19 Piezoelektrické generátory firmy Mide Technology Corporation, a) V25w, b) PEH20w [22]

Vylepšený systém s rezonanční frekvencí 608 Hz generoval špičkové napětí 0,89 V s výkonem 2,16 μ W. Na obr. 20 je fotografie MEMS generátorového pole s tlustovrstvovými piezoelektrickými nosníky. Generátorový systém lze ladit na frekvence mechanického buzení okolních vibrací [23], [20].

MEMS generátory s nosníkem jsou realizovány novými mikroelektronickými technologiemi, tzv. mikroobráběním (leptání motivů na povrchu nebo v objemu materiálu), které umožňuje realizaci nových struktur vhodných pro piezoelektrické generátory energie.

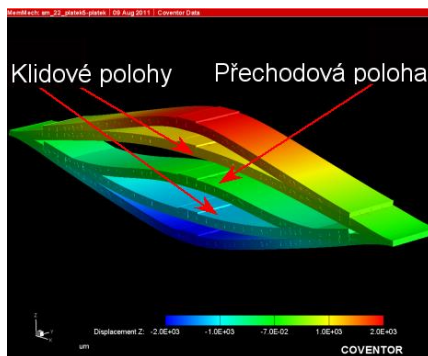


Obr. 20 MEMS piezoelektrický generátor s polem různě laděných nosníků [23], [20]

b) Piezoelektrické generátory s bistabilní strukturou [20]

Pro vytvoření bistabilního piezoelektrického systému lze využít různé základní mikrosystémové struktury, jako např. nosník, můstek, membrána apod.

Můstková struktura je vytvořena oboustranně vetknutým nosníkem (můstek) se seismickou hmotou umístěnou ve středu struktury. Mechanické předpětí vytvořené uvnitř struktury např. stlačením, strukturu prohne. Působením vibrací (při dosažení mezní hodnoty zrychlení) se můstek překlápí mezi dvěma krajními polohami - obr. 21. Systém se v okolí každé polohy chová jako monostabilní systém. Přechod mezi polohami nastává skokem při překonání určité kritické síly. V monostabilním režimu struktura vykazuje rezonanční chování, vlastnosti se v podstatě neliší od základních nosníkových struktur. V bistabilním režimu nastane překlopení do druhé polohy působením jediného vnějšího impulsu. Konstrukce struktury umožňuje značné rozšíření frekvenčního rozsahu budících mechanických vibrací, zejména směrem k nižším frekvencím, které se v okolním prostředí vyskytují častěji pro účely využití v generátorech EH. Frekvenční rozsah zdola limituje k nule, shora jej omezuje vyšší mód kmitání nosníku. Výhoda bistabilních struktur je široké pásmo pracovních frekvencí a vyšší výstupní výkon než u monostabilních struktur. Nevýhoda je nutnost překonání prahových sil pro bistabilní funkci. Na obr. 15 je model bistabilní můstkové struktury, kde reálná struktura můstku byla vyrobena výřezem z membrány piezoelektrického elektroakustického měniče s délkou 20 mm a šířkou 5 mm. Pro vytvoření mechanického předpětí byl nosník stlačen o 0,2 mm [24].



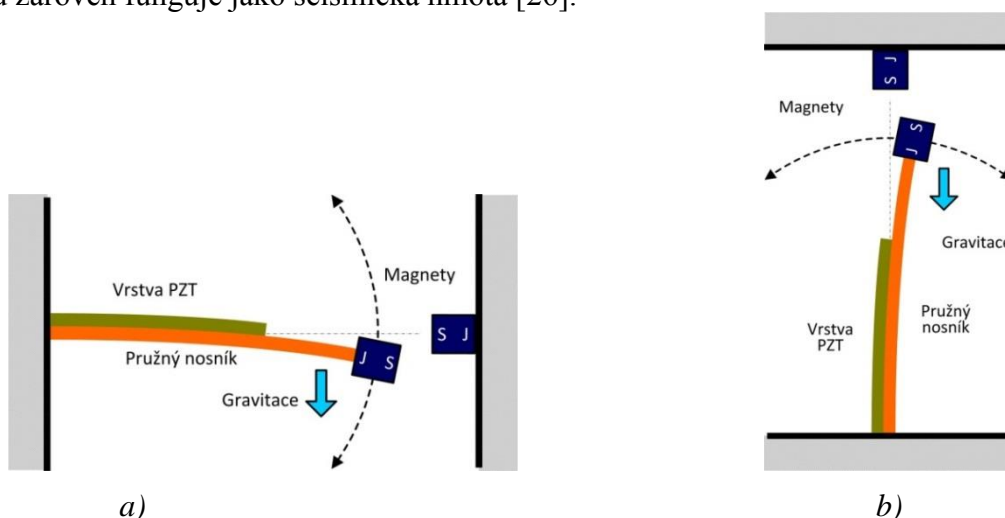
Obr. 21 Model bistabilní struktury s mechanicky vytvořeným předpětím můstkové struktury [24]

Bistabilní režim membrány je definován jejím prohnutím v nevybuzeném stavu. Jedná se o analogii dvojrozměrné verze můstkového provedení. Na obr. 22 je simulace prohnutí membrány ve dvou krajních stavech [25]. Klidové prohnutí membrány lze vytvořit při výrobě, např. využitím rozdílné teplotní roztažnosti použitých materiálů.



Obr. 22 Model bistabilní MEMS membrány s průměrem 300 µm ve dvou krajních stavech prohnutí [25]

Bistabilní režim nosníku buzeným magnetickým polem, kde se dvou stabilních stavů dosáhne použitím permanentních magnetů, je uveden na obr. 23. Na levé straně je vetknutý nosník s piezoelektrickou vrstvou, na konci nosníku je umístěn permanentní magnet. Proti tomuto magnetu je umístěn pevný permanentní magnet. Pro dosažení vychylování magnetickým polem uspořádání magnetů je takové, aby siločáry magnetů byly orientovány proti sobě, vzájemným působením se dosáhne vychýlení nosníku na jednu stranu. Magnet na konci nosníku zároveň funguje jako seismická hmota [26].

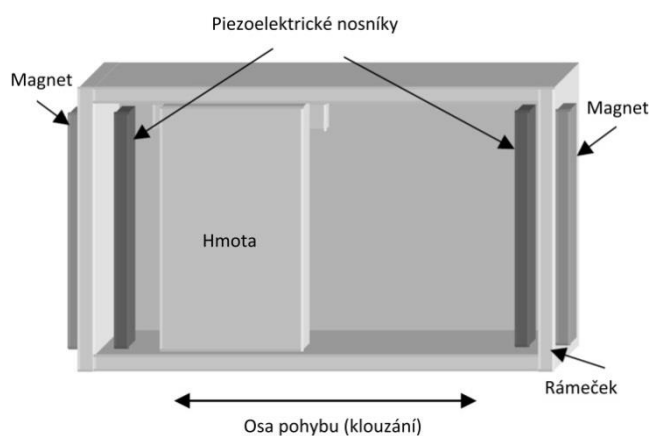


Obr. 23 Princip činnosti bistabilní struktury s nosníkem a magnetickým buzením
a) vertikální pohyb, b) horizontální pohyb [20]

c) Piezoelektrické generátory s využitím nárazové energie

Byl zkoumán jev mechanického nárazu Ni hmoty na piezoelektrickou desku PZT. Práce zjišťovala optimální montážní uspořádání piezoelektrické desky se zahrnutím křemíkového nosníku se sendvičovým uspořádáním mezi dvěma deskami PZT vytvářejícími rezonanční strukturu.

Generátor využívající energie vzniklé nárazem na piezoelektrický materiál je tvořený inerciální hmotností umístěnou uvnitř rámečku, ale volně se pohybující podél jedné osy. Ocelová setrvačná hmota 750 mg má v kluzné ose délku 2 mm, 10 mm šířku a 5 mm sílu. Rám je 12 mm dlouhý v kluzné ose a 10 mm široký. Energie je generována nárazem setrvačné hmoty na PZT nosníky. Pro zvýšení výkonu a bistabilního režimu činnosti se používají magnety umístěné na koncích rámu – obr. 24. Generátor je schopný vytvořit výstupní výkon až $40 \mu\text{W}$ při objemu 1 cm^3 a buzením vibracemi s amplitudou 10 cm při 1 Hz (odpovídá zrychlení $0,1 \text{ ms}^{-2}$).



Obr. 24 Bistabilní piezoelektrický generátor $40 \mu\text{W}$, objem 1 cm^3 , buzení 10 cm při 1 Hz [27], [20].

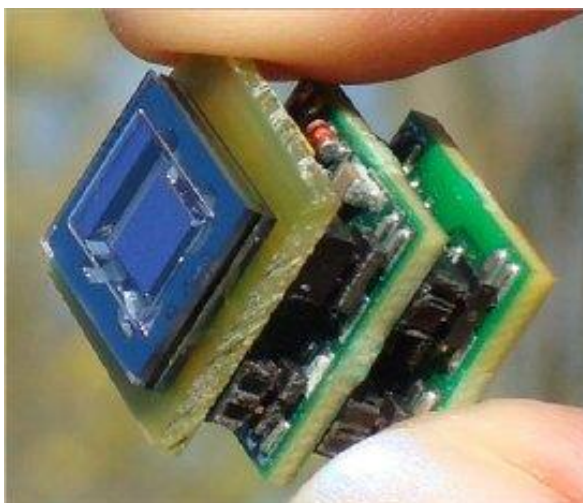
d) Piezoelektrické generátory realizované MEMS technologiemi

Příklad kompletního MEMS generátoru EH vyvinutého na universitě v Portland (USA) spolu s drobnými obvodovými prvky a objemem 27 mm^3 je na obr. 25 [28]. Systém pracující s frekvencí vibrací 14 až 155 Hz je schopný vyrobit $200 \mu\text{W}$. Vyrobená energie je skladována v superkondenzátoru s napětím 1,85 V. Odhadem bude systém bez znatelné degradace pracovat po dobu 10 až 20 let.



Obr. 25 Kompletní piezoelektrický generátor typu EH realizovaný objemovým mikroobráběním piezoelektrického materiálu [28]

Piezoelektrický generátor EH vyvinutý v IMEC v Belgii využívající levné CMOS technologie kompatibilní s MEMS technologií s procesy na 6 palcových Si deskách, teplotní senzor napájený EH generátorem je uvedený na obr. 26 [29]. Systém EH generuje elektrickou energii 85 μW z vibrací 150 Hz až 1,2 kHz.



Obr. 23 Plně autonomní bezdrátový teplotní senzor napájený vibrační energií EH [29]

Využitím piezoelektrických generátorů pro generování elektrické energie na pozemních komunikacích se zabývají v Izraeli. Cílem je využití „odpadové mechanické“ energie (vibrace, tlaky) na pozemních komunikacích a přeměna této energie na elektrickou. Vyvinuli piezoelektrické generátory, které zapojené do sítě aplikovali na 100 m úsek silnice. Předpokládá se, že by bylo možné získat energii z mechanického namáhání povrchu komunikace u dvoupruhové silnice až 400 kW/1 km. Předpokládán se i možnost využití použitého principu v dalších aplikacích, jako na letištních plochách, železnici apod. Systému navíc umožní poskytovat data v reálném čase, jako hmotnost, frekvence a rozestup mezi projíždějícími vozidly.

Piezoelektrické generátory nejčastěji pro svou činnost využívají energii mechanických vibrací, ale lze využít i energii dalších zdrojů jako je např. proudění tekutin. PVDF membránu umístěnou v dynamicky proudící tekutině (vytvořené víry) lze využít pro výrobu elektrické energie. Byly realizovány generátory s PVDF membránou s tloušťkou až 0,7 mm a délkou 0,457 m [30]. Aplikace generátoru tohoto typu je omezena na velkorozměrové fluidické aplikace, nachází uplatnění např. při napájení senzorů mořských bójí.

Uplatnění je významné i v bezdrátových senzorových sítích. Piezoelektrický generátor umístěný v komerčním bezdrátovém vypínači generuje přepínáním energii, kterou lze využívat na přenos informace do uzlu bezdrátové sítě, uzel komunikuje s přepínačem.

Závěr

Využití elektromagnetických, piezoelektrických a dalších fyzikálních principů pro autonomní mikronapájecí systémy s energií okolního světa a využití nanotechnologií, nanodrátů např. pro implantovatelné systémy člověka, piezoelektrické textilie a dalších progresivních systémů je v současné době předmětem dalšího výzkumu a postupné komercializace.

Poděkování

Podklady získané pro článek byly částečně podpořeny projektem Ministerstva vnitra č. VG20102015015 „Miniaturní inteligentní analyzační systém koncentrací plynů a škodlivých látek, zejména toxických“, částečně grantem ČVUT č. SGS14/195/OHK3/3T/13 „Vývoj inteligentních součástek a systémů na poli mikroelektroniky, nanoelektroniky a optoelektroniky“.

Literatura:

- [1] Husák, M.: Mikroelektronické zdroje energie z okolí – Energy harvesting, DPS, č. 2, 2013
- [2] Roger Allan, Energy harvesting Efforts Are Picking Up Steam, Power Electronics Rechnology, Mar 23, 2012
- [3] Emerging energz harvesting devices report, Zole Developpement, November 2012
- [4] What is Energy harvesting, Hi-Globe 2013, http://hi-globe.com/?page_id=85
- [5] Yildiz, F.: Potential Ambient Energy-harvesting Sources and Techniques, The journal of technology studies, Volume 35, Number 1, 2009
- [6] Torres, E. O., Rincón-Mora, G. A. (2005). Energy-harvesting chips and the quest for everlasting life. IEEE Georgia Tech Analog and Power IC Design Lab.
- [7] Mikami, S., Tetsuro, M., Masahiko, Y., & Hiroko, O. (2005). *A wireless-Interface SoC powered by energy harvesting for short-range data communication*. IEEE 0-7803-9162-4/05 2005.
- [8] Sterken, T., Fiorini, P., Baert, K., Puers, R., & Borghs, G. (2003). An electret-based electrostatic μ - generator. *IEEE* 0-7803-7731-1/03.
- [9] Marzencki, M. (2005). *Vibration energy scavenging*. European Commission research Project VIBES (IST-1-507911) of the 6th STREP Framework Program.
- [10] Roundy, S., & Wright, P. K. (2004). A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Materials and Structures*, 13, 1131-1142
- [11] Pacific Northwest National Laboratory (PNNL). Available technologies (2007). Patent Pending, Battelle Number(s): 12398-E, 13664-B, Retrieved October 6, 2009, from <http://availabletechnologies.pnl.gov/technology.asp?id=85>
- [12] Thomas, J., Clark, J. W., & Clark, W. W. (2005). *harvesting energy from piezoelectric material*. *IEEE CS*. University of Pittsburgh, 1536-1268.
- [13] Fujitsu Develops Hybrid Energy harvesting Device for Generating Electricity from Heat and Light, Fujitsu Laboratories Ltd.2010, <http://www.fujitsu.com/global/news/pr/archives/month/2010/20101209-01.html>
- [14] Shaschank, O. et al, Energy harvesting technologies, Springer, 2009.
- [15] Husák, M.: DPS, č. 3, 2013
- [16] Williams C B at al, 2001, *IEE Proc. Circuits Devices Syst.* 148
- [17] Williams C W a t al, 1996, *IEE Coll. On Compact Power Sources (London)* 7/1–7/3
- [18] <http://www.vibes.ecs.soton.ac.uk/emgen.htm>
- [19] EnOcean, www.enocean.com
- [20] Husák, M.: DPS, č. 4, 2013
- [21] *Smart Mater. Struct.* 13 1131–42
- [22] <http://www.mide.com/prod energy harvester.html>

- [23] *Microelectronics Journal*. 2008;39 802-806
- [24] Majer, M.: Mikrogenerátory elektrické energie, Písemná studie k disertační práci, ČVUT 2012
- [25] *J. Micromech. Microeng.* 20 (2010) 075013 (6pp)
- [26] *Applied Energy*, Volume 97, September 2012, Pages 771–776
- [27] *Tech. Digest 13th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators Transducers '05 (Seoul, Korea)* vol 1, pp 784–7
- [28] *EE Times*, 4/28/2011,
http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1259390&print=yes
- [29] *AZOM* 12/2009, <http://www.azom.com/news.aspx?newsID=20082>
- [30] *J. Fluids Struct.* 15 629–40

PŘÍLOHY

Jednotlivé přednášky a tento sborník jsou dostupné v elektronické podobě na webu pořadatele semináře:

www.roznovskastredni.cz/pel