

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

# **DIZERTAČNÍ PRÁCE**

Brno, 2025

Ing. Jiří Zukal



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TEORETICKÉ A EXPERIMENTÁLNÍ ELEKTROTECHNIKY

DEPARTMENT OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ELECTRICAL ENGINEERING

## ALTERNATIVNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

ALTERNATIVE SOURCES OF ELECTRICAL ENERGY

### DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Jiří Zukal

### ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

BRNO 2025

## Abstrakt

Téma disertační práce je zaměřeno na výzkum a návrh koncepce zařízení pro účinný převod posuvného mechanického pohybu na elektrickou energii využitím elektromagnetického principu. Generátor (harvester) pracuje v oblasti přeměny okamžitě dodaného elektrického výkonu v rozsahu  $P_{\text{out}} = 100\text{--}10\,000$  W. Jako mechanický pohon je uvažována lineární spalovací jednotka. Navržená sestava může nalézt uplatnění v automobilovém průmyslu jako jednotka sériového hybridního pohonu nebo jako prodlužovač dojezdu (range extender) u bateriového elektromobilu. Využití je možné také jako stacionární generátor elektrické energie.

Výzkum je rozdělen do tří oblastí:

1. První oblast se zabývá návrhem elektromagnetické části lineárního generátoru, řešením magnetického obvodu a přizpůsobením dynamiky pohybu pro optimální transformaci energie.
2. Druhá oblast je zaměřena na samotnou pohonnou jednotku, jeho konstrukční návrh a návrh řídicího systému zajišťujícího optimální funkci harvesteru.
3. Třetí oblast se soustředí na vazbu elektromagnetického generátoru a lineárního pohonu, například spalovacího motoru s volnými písty (free-piston linear engine), a na společnou koexistenci obou částí, jak teoreticky popsanou tak experimentálně ověřenou.

Experimentální ověření lineárního generátoru bylo provedeno na laboratorním modelu používaných lineárních generátorů. Dále byl zkoumán a navržen elektronický obvod pro řízení odebraného výkonu na základě PFC obvodu.

## Klíčová slova:

Numerické modelování, harvester, doprava, elektromagnetické pole

## Abstract

The topic of the dissertation is focused on research and design of a concept of a device for the efficient conversion of sliding mechanical motion into electrical energy using the electromagnetic principle. The generator (harvester) works in the field of converting immediately supplied electrical power in the range  $P_{\text{out}} = 100\text{--}10,000$  W. A linear combustion unit is considered as a mechanical drive. The proposed assembly can find application in the automotive industry as a series hybrid drive unit or as a range extender for a battery electric vehicle. It can also be used as a stationary generator of electrical energy.

The research is divided into three areas:

1. The first area deals with the design of the electromagnetic part of the linear generator, the solution of the magnetic circuit and the adaptation of the dynamics of movement for optimal energy transformation.
2. The second area is focused on the drive unit itself, its structural design and the design of a control system ensuring optimal function of the harvester.
3. The third area concentrates on the coupling of an electromagnetic generator and a linear drive, for example a free-piston linear engine, and on the coexistence of both parts, both theoretically described and experimentally verified.

The experimental verification of the linear generator was carried out on a laboratory model of the used linear generators. Furthermore, an electronic circuit for controlling the power consumption based on a PFC circuit was investigated and designed.

## Key words:

Numerical modelling, harvester, transportation, electromagnetic field

ZUKAL, Jiří. ALTERNATIVNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE [online]. Brno, 2025 [cit. 2025-12-30]. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky. Vedoucí práce prof. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.



### PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem „ALTERNATIVNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE“ vypracoval samostatně, pod vedením školitele a s využitím výhradně odborných referencí a dalších informačních zdrojů citovaných v práci a uvedených v komplexní bibliografii na konci práce. Jako autor dále prohlašuji, že jsem při tvorbě této disertační práce neporušil žádná autorská práva ani nikomu neporušil osobní a/nebo majetková práva. V této souvislosti si jsem plně vědom důsledků porušení ustanovení §11 autorského zákona č. 121/2000 Sb., ve znění pozdějších předpisů, a jakéhokoli porušení práv souvisejících s duševním vlastnictvím nebo práv zavedených v rámci novel příslušných zákonů, jako je zákon o duševním vlastnictví nebo trestní zákoník, zákon č. 40/2009 Sb., § 2, hlava VI, část 4.

### DECLARATION

I declare that I have written the Doctoral Thesis titled “ ALTERNATIVNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE ” independently, under the guidance of the advisor and using exclusively the technical references and other sources of information cited in the thesis and listed in the comprehensive bibliography at the end of the thesis. As the author I furthermore declare that, with respect to the creation of this Doctoral Thesis, I have not infringed any copyright or violated anyone’s personal and/or ownership rights. In this context, I am fully aware of the consequences of breaking Regulation §11 of the Copyright Act No. 121/2000 Coll. of the Czech Republic, as amended, and of any breach of rights related to intellectual property or introduced within amendments to relevant Acts such as the Intellectual Property Act or the Criminal Code, Act No. 40/2009 Coll., Section 2, Head VI, Part 4.

Brno .....

.....

Podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mému vedoucímu práce za jeho metodologický přístup v mém studiu a vědecké práci na všech částech výzkumu, které mě při doktorském studiu potkaly. Oceňuji věcný a racionální přístup, doporučení a směřování při soustavném odborném vdení.

Dále bych také poděkoval všem kolegům UTEE, za vytvoření podmínek podporující přirozenou kreativitu a usnadnění ve studiu a odborné vědecké práci.

## Obsah

Použité zkratky a symboly .....	9
1. Úvod .....	13
2. Přehled současného stavu .....	14
a. Oblast návrhu pouze spalovací části motoru .....	18
b. Oblast návrhu čistě elektrické části .....	19
c. Generátory získávající energii z moře .....	19
d. Srovnání, analýzy, studie vazeb generátoru .....	20
3. Cíle práce.....	23
4. Koncepce generátorů a využití v „harvestingu“ .....	24
5. Návrh teoretického modelu elektromagnetického mechanicky poháněného lineárního EM generátoru.....	35
6. Numerický model .....	37
7. Blokové uspořádání generátoru.....	42
8. Přínos a novost práce.....	85
9. Závěr.....	85
<b>Literatura .....</b>	<b>86</b>

## Použité zkratky a symboly

AC	Střídavý proud (Alternating Current)
BEV	Bateriový elektromobil (Battery Electric Vehicle)
CCM	Režim spojitého/kontinuálního vedení proudu (Continuous Conduction Mode)
CO <sub>2</sub>	Kysličník uhličitý
CRM	Režim kritického vedení proudu (Critical Conduction Mode)
C <sub>v</sub>	Vyhlazovací kondenzátor
DC	Stejnosměrný proud (Direct Current)
DCM	Režim nespojitého/přerušného vedení proudu (Discontinuous Conduction Mode)
DPS	Deska plošných spojů
EH	Získávání energie z okolí (Energy Harvesting)
EM	Elektromagnetický (Electromagnetic)
FCEV	Elektromobil s palivovým článkem (Fuel Cell Electric Vehicle)
FEM	Metoda konečných prvků (Finite Element Method)
FEMM	Metoda konečných prvků pro magnetické pole (Finite Element Method Magnetics)
FPE	Motor s volným pístem (Free–Piston Engine)
FPLA	Lineární alternátor s volným pístem (Free–Piston Linear Alternator)
FPLG	Lineární generátor s volným pístem (Free–Piston Linear Generator)
HCCI	Homogenní zapalování směsi při kompresi (Homogeneous Charge Compression Ignition)
ICE	Spalovací motor (Internal Combustion Engine)
L1, L2, L3	Označení vinutí cívky v segmentu
MKP	Metoda konečných prvků
MOSFET	Typ tranzistoru (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
OZ	Operační zesilovač
PCB	Deska plošných spojů (Printed Circuit Board)
PFC	Kompensace účinníku (Power Factor Correction)
PM	Permanentní magnet (Permanent Magnet)
PMIC	Integrovaný obvod pro řízení napájení (Power Management Integrated Circuit)
REX	Prodlužovač dojezdu (Range Extender)
R <sub>z1</sub>	Rezistivní zátěž
R <sub>z2</sub>	Rezistivní zátěž
S1, S2, S3, S4	Označení segmentu generátoru
SBD	Schottkyho dioda (Schottky Barrier Diode)
SMD	Povrchově montovaná součástka (Surface–Mount Device)
THT	Součástka s vývody do otvorů (Through–Hole Technology)

### Veličiny

<b>A</b>	vektor magnetického potenciálu	Wb/m
<i>a</i>	velikost zrychlení tělesa	m/s <sup>2</sup>
<b>a</b>	vektor zrychlení (d <sup>2</sup> x/dt <sup>2</sup> )	m/s <sup>2</sup>
<i>a<sub>i</sub></i>	uzlová hodnota vektorového mag. potenciálu	Wb/m
<b>B</b>	vektor plošné hustoty magnetického toku, indukce	T
<i>B</i>	modul plošné hustoty magnetického toku, indukce	T
<b>B<sub>br</sub></b>	brzdná složka vektoru hustoty magnetického toku	T
<b>B<sub>M</sub></b>	maximum modulu hustoty magnetického toku	T
C <sub>v</sub>	vyhlazovací kapacita	F

$D$	modul hustoty elektrického toku, indukce	$C/m^2$
$\mathbf{D}$	vektor hustoty elektrického toku, indukce	$C/m^2$
$d\ell$	délka posunutí	m
$d\Phi/dt$	časová změna magnetického toku	Wb/s
$dU_f$	úbytek napětí na diodě v propustném směru	V
$dU_m$	úbytek napětí na usměrňovacím můstku	V
$d\mathbf{S}$	element vektoru orientované plochy	$m^2$
$dt$	změna času	s
$d_v$	vzdálenost vzduchové mezery	m
$dx$	změna/výchylka v ose x	m
$\mathbf{E}$	vektor intenzity elektrického pole	V/m
$\mathbf{E}(t)$	vektor okamžité hodnoty intenzity elektrického pole	V/m
$E$	modul intenzity elektrického pole	V/m
$\rho_{ef}$	objemová hustota hmotnosti (efektivní hustota)	$kg/m^3$
$\phi_e$	uzlová hodnota skalárního el. potenciálu	V
$F_{alt}$	síla alternativního původu	N
$F_{br}$	brzdná síla	N
$F_{em}$	síla vyvozená elektromagnetickou energií	N
$F_{mech}$	síla vyvozená mechanickou energií	N
$f$	kmitočet	Hz
$f_{mag}$	měrná magnetická síla	$N/m^3$
$f_{mech}$	měrná síla mechanického původu	$N/m^3$
$f_m$	měrná síla pohyblivé části	$N/m^3$
$f_p$	pracovní frekvence	Hz
$\mathbf{g}$	vektor gravitačního zrychlení	$m/s^2$
$g(t)$	modul časově závislého gravitačního zrychlení	$m/s^2$
$G$	násobek gravitačního zrychlení Země	–
$H$	modul magnetické intenzity	A/m
$\mathbf{H}$	vektor magnetické intenzity	A/m
$H_M$	maximum modulu magnetické intenzity	A/m
$I$	maximální hodnota elektrického proudu	A
$I_{gen}$	elektrický proud dodávaný generátorem	A
$I_{gen,150}$	elektrický proud dodávaný generátorem při zátěži 150 $\Omega$	A
$i(t)$	okamžitá hodnota elektrického proudu	A
$i_{ave}(t)$	průměrná hodnota okamžitého elektrického proudu	A
$I_p$	špičkový elektrický proud	A
$I_{start}$	rozběhový elektrický proud	A
$\mathbf{J}$	vektor proudové hustoty	$A/m^2$
$\mathbf{J}_{circ}$	vektor proudové hustoty vinutí cívky	$A/m^2$
$\mathbf{J}_m$	proudová hustota generované mechanickým pohybem	$A/m^2$
$\mathbf{J}_s$	vektor zdroje proudové hustoty	$A/m^2$
$\mathbf{J}_v$	vektor proudové hustoty generované vířivými proudy	$A/m^2$
$k$	koeficient tuhosti soustavy	N/m
$k_c$	koeficient celkové tuhosti systému	N/m
$\ell$	délka křivky	m
$l_c$	koeficient tlumení pohybu tělesa	Ns/m
$l_{ce}$	koeficient celkového tlumení systému	Ns/m
$L$	elektrická indukčnost	H
$M$	modul magnetizace	A/m
$\mathbf{M}$	vektor magnetizace	A/m
$m$	hmotnost tělesa	kg
$m_c$	celková hmotnost pohyblivé části systému	kg
$N_s$	počet uzlů elementu diskretizované sítě	–
$N_\phi$	počet uzlů elementu modelu s elektrickým potenciálem	–

$N_A$	počet uzlů elementu modelu s magnetickým potenciálem	–
$N_c$	počet závitů vinutí cívky	–
$\mathbf{n}$	normálový jednotkový vektor	–
$n_s$	počet segmentů	–
$\Omega$	oblast	–
$\Omega_m$	oblast s magnetickým polem	–
$\Omega_v$	oblast vodiče	–
$\Omega_s$	oblast s definovaným rozložením proudů	–
$\Omega_s \subset \Omega$	podmnožina hlavní oblasti	–
$P$	elektrický výkon	W
$p_{efd}$	objemová hustota výkonu	W/m <sup>3</sup>
$P_{out}$	dodávaný elektrický výkon	W
$P_{out}$	výstupní elektrický výkon	W
$p_A$	konečná hodnota tlaku média	Pa
$p_B$	počáteční hodnota tlaku média	Pa
$R_1$	odpor zátěže	$\Omega$
$S$	plocha oblastí	m <sup>2</sup>
$S_i$	vektor souřadnice polohy uzlu $i$	m
$S_c$	velikost aktivní plochy cívky	m <sup>2</sup>
$\mathbf{s}$	vektor posunutí	m
$S_v$	průřez vodiče vinutí	m <sup>2</sup>
$t$	čas	s
$U$	elektrické napětí	V
$U_{AC}$	efektivní hodnota elektrického napětí (RMS)	V
$u(t)$	okamžitá hodnota elektrického napětí	V
$u_{AC}(t)$	okamžitá hodnota vstupního napětí	V
$U_{ef}$	velikost efektivní hodnoty elektrického napětí	V
$U_{gen}$	velikost výstupního napětí generátoru	V
$U_{gen,str}$	střední hodnota výstupního napětí generátoru	V
$U_{genS1,S2,S3,S4}$	výsledná velikost elektrického napětí na výstupu generátoru	V
$u_{in}(t)$	okamžitá hodnota vstupního elektrického napětí	V
$U_{max}$	maximální hodnota elektrického napětí	V
$U_{start}$	rozběhové elektrické napětí	V
$U_{start,ef}$	efektivní hodnota rozběhového napětí	V
$U_{start,gen}$	výstupní rozběhové napětí generátoru naprázdno	V
$U_d$	velikost závěrného elektrického napětí diody	V
$u_{gen}(t)$	okamžitá hodnota celkového výstupního střídavého napětí generátoru	V
$u_{gen,d}(t)$	okamžitá hodnota výstupního napětí za usměrňovacím můstkem	V
$V_J$	objem elektricky vodivých složek	m <sup>3</sup>
$V_{Jc}$	objem vodičů cívky	m <sup>3</sup>
$V_B$	objem stlačeného média (vzduchu)	m <sup>3</sup>
$v$	velikost okamžité rychlosti	m/s
$\mathbf{v}$	vektor rychlosti	m/s
$\mathbf{v}(t)$	vektor okamžité rychlosti	m/s
$V_m$	objem permanentního magnetu	m <sup>3</sup>
$w$	objemová hustota energie	Ws/m <sup>3</sup>
$W$	bázová funkce	–
$W_{1m3}$	energie stlačeného média (vzduchu)	J
$W_J$	energie přeměněná na Jouleovo teplo	J
$W_k$	kinetická energie	J
$W_m$	energie v magnetu	J
$W_p$	potenciální energie	J
$x$	poloha, výchylka	m
$x$	poloha tělesa	m
$\dot{x}$	rychlost pohybující se části tělesa ( $dx/dt$ )	m/s

$\ddot{x}$	zrychlení pohybující se části tělesa ( $d^2x/dt^2$ )	$m/s^2$
$Z$	impedance	$\Omega$
$\gamma$	měrná elektrická vodivost	$S/m$
$\rho_e$	objemová hustota elektrického náboje	$C/m^3$
$\eta$	elektrická účinnost	–
$\varepsilon_0$	elektrická permitivita vakua	$F/m$
$\varepsilon_r$	relativní elektrická permitivita	–
$\mu_0$	magnetická permeabilita vakua	$H/m$
$\mu_r$	relativní magnetická permeabilita	–
$\Phi$	magnetický tok	$Wb$
$\omega$	úhlová frekvence	$rad/s$

# 1. Úvod

V industriálním světě se různými způsoby a formami transformuje energie tak, aby byla využitelná k lidské činnosti nebo dalšímu využití. Poslední období průmyslové revoluce (přibližně 200 let) je poznamenáno snahami zaměřenými výrazně na přeměnu různých forem energie na elektrickou energii a dále pak na její využití, zpracování, přenos a uskladnění [1], [2], [3]. Důvodem tohoto kroku je snadný a efektivní přenos této formy energie, nevýhodou je její cena a řešení skladování-akumulace [8], [9]. Začátky činností se soustředily na zvládnutí procesu přeměny-přenosu-zpracování elektrické energie [4], [5], [6], [7], dále pak na tvorbu koncepcí zdrojů elektrické energie s okamžitým dodávaným výkonem [10], [11]. S postupem času industrializace života se projevilo zaměření na koncepci a realizaci velkých zdrojů energie (stacionární elektrárny) [12], [13] posunulo se snažení směrem na výrobu malých zdrojů, převážně mobilních, a optimalizaci celého procesu hospodaření s energií [14], [15], [16]. Směr vývoje dále pokračoval ke snahám o miniaturizaci zařízení produkující/využívající elektrickou energii [17], dále na snížení přenosových ztrát a zvládnutí uchování energie (akumulace energie) [18], [19]. Poslední část našeho století se zaměřuje na optimalizaci spotřeby v časovém rámci [20]. Proto se objevují koncepce zařízení pro přeměnu „nevyužívaných/zbytkových“ energií, a specializované směry řešení tzv. harvestingu [21].

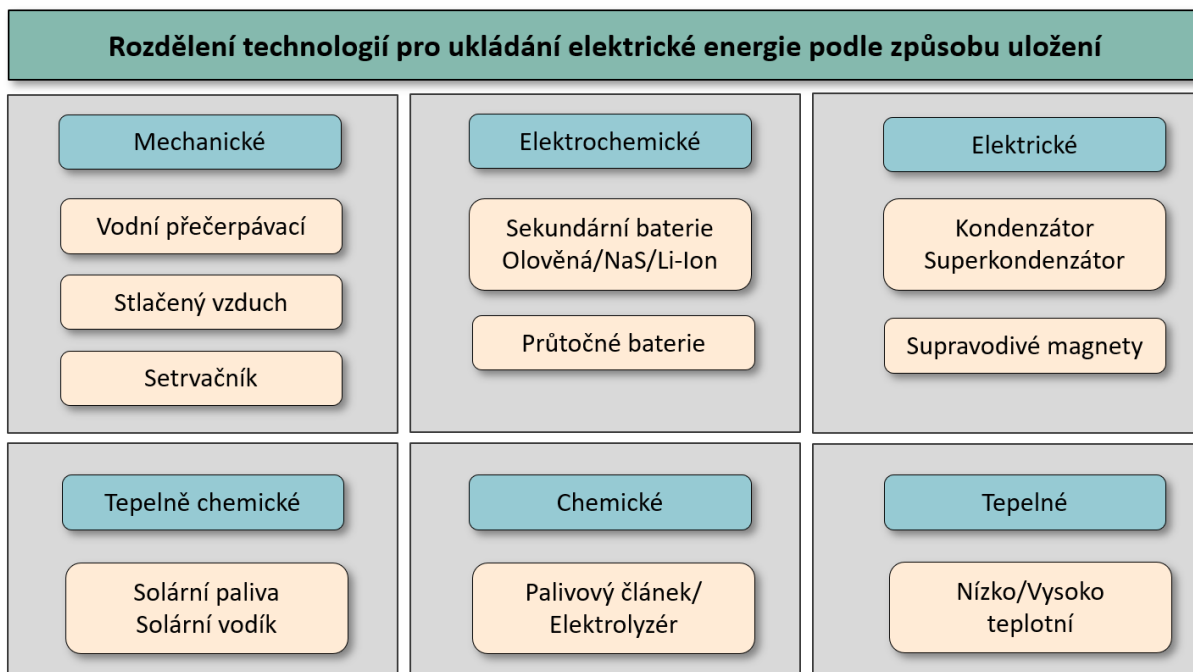
Energy harvesting (EH) je souhrnné označení procesu a způsobu přeměny jedné formy energie na elektrickou, a to s využitím jevů fyzikálně a technicky využitelných s racionální mírou účinnosti [13–16], [22–31]. EH tak umožňuje produkovat elektrickou energii z dynamických nebo statických dějů, fyzikálních, chemických a sdružených forem jako jsou například různé druhy pohybu hmoty, šíření elektromagnetické vlny (včetně mechanické) [24–28], vibrace, rotace, změny teplot, dopadu světla, mikropohyby, nanopohyby (molekulární a atomární úroveň, získání energie z plazmatu) atp. [29–30] Byly publikovány i detailní problémy návrhů jádra harvesterů [31–33].

Přesný český ekvivalent tohoto termínu nebyl jednoznačně zaveden, EH lze však volně přeložit jako získávání/vytěžování/transformace energie. Dalšími anglickými pojmy transformace energie na elektrickou jsou energy scavenging [34], power harvesting [35].

Pojem EH neuvažujeme jako jakékoli zpracování energie a její transformaci na elektrickou z okolních zdrojů, ale pouze jistou vymezenou část s využíváním principů a zařízení pro její přeměnu [36]. Zbylé principy transformace zůstávají zahrnuty pod pojmem generování [35], [37], výroba [38] atp. elektrické energie, například přeměna proudění média – voda, vzduch a transformace dopadající vlny - fotovoltaické systémy [39].

Zdroje a systémy dodávající elektrickou energii je možné rozdělit do kategorií a to například podle výstupního – dodávaného elektrického výkonu, elektrického napětí jako: velké, střední, malé a mikro (nano) zdroje [27–30] [32], [40], [41]. Zařízení transformace zbytkové energie, makro EH, se ale do klasifikace energy harvesterů běžně nezahrnují. Zdroje s výkonem do  $P_{out} = 10\text{kW}$  a v mobilních zařízení již ale zařadit do oblasti robustního harvestingu lze [41]. Zdroje s alternativním způsobem přeměny energií z výše uváděných způsobů jsou závislé na okolních podmínkách, jako je okamžitý stav zdroje- slunce, vítr, příboj, atd. tedy počasí ale také na klimatu a podnebí. Jedná se o dlouhodobé získávání a využívání těchto energií.

Uplatnění alternativních zdrojů elektrické energie v kategorii harvestingu najdeme v mobilních [42] nebo bezdrátových zařízeních [43], čidlech [44], autonomních elektrických a elektronických zařízeních [45], u kterých je autonomní napájení výhodné, případně nezbytné. Je to zejména dáno parametrem doby chodu zařízení bez možnosti připojení ke stabilnímu (nemobilní síti) zdroji elektrické energie [46]. Tato zařízení, jako nedílný prvek konstrukce, využívají také některý z akumulčních prvků a zařízení, například přímého ukládání energie do elektrochemické baterie, kondenzátoru, superkapacitoru, induktoru atp. [47] nebo nepřímého ukládání s využitím transformačního prvku, fyzikálního prvku (stlačený vzduch, reakce vodíku a kyslíku, palivové jaderné články atp. ) [47], [48–49]. Principiální rozdělení technologií pro ukládání elektrické energie je zobrazeno na obr. 1. Zajímavou částí oblasti harvestingu je využití energie lidského těla [27], jak pro napájení protetik nebo diagnostických lékařských zařízení a to z produkované teploty lidského těla nebo pohybu těla.



**Obr. 1** Principiální dělení technologií pro ukládání elektrické energie podle způsobu uložení [47].

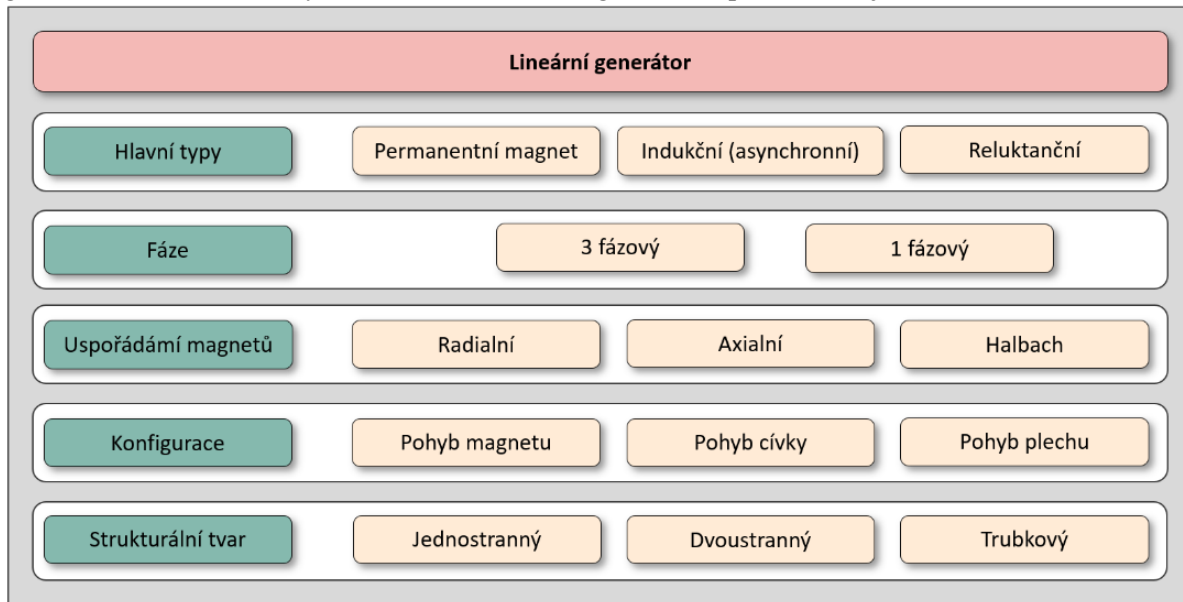
## 2. Přehled současného stavu

Výzkum se zaměřuje na návrh účinných způsobů transformace energie na elektromagnetické pole. Současná řešení využívají převodu mechanického pohybu na elektrickou energii. Tato řešení a navržená zařízení se v technice řadí do oblasti generátorů nebo harvestorů. Jeden z trendů a návrhů zařízení je z oblasti přeměny okamžitého dodaného/přeneseného elektrického výkonu v rozsahu výkonů  $P = 100\text{--}10\,000\text{ W}$ . Tato oblast se v současnosti dostává do popředí jak vědecké, tak výrobní pozornosti. Dostupné publikované práce lze členit do několika okruhů. Prvním je oblast návrhu a řešení elektrické, elektronické a elektromagnetické, ve kterých byly významné práce uvedeny [50–82]. Druhá oblast řešené problematiky je skupina prací zaměřena na problematiku spalovací části motoru, sloužící k pohonu lineárního generátoru [83–107]. Zajímavou skupinou jsou práce, které se zabývají návrhem jak spalovací, tak konstrukcí elektromagnetické části generátoru [108–124]. Zvláštní skupinu publikací tvoří práce a řešení lineárního pohybu pohonné jednotky na základech hydraulického přenosu dynamické energie na pohyblivý element lineárního generátoru [125–127]. Specifickou oblastí publikovaných návrhů systému generátoru (převodu pohybové energie na elektrickou) jsou výzkumy zabývající se řízením, modelováním, simulací, měřením a vyhodnocováním parametrů modelů [128–147].

První podrobnější náhled do rozboru a řešení koncepce elektromagnetického generátoru a vážnější pokusy o vytvoření matematického modelu a možnost numerického modelování s návaznou simulací hybridního motoru přináší například práce [123], dále se návrhem čistě elektromagnetické oblasti, tedy elektromagnetickou přeměnou pomocí generátoru zabývá text v práci [58]. Jiný přístup a směr výzkumu vede k návrhu a řešení pohonné jednotky lineárních generátorů/motorů, a to spalovací jednotka motoru s volnými písty. Ten má vzhledem k rotačnímu motoru s klikovým mechanismem pouze jeden nebo dva písty spojené společnou hřídelí [128], [130] a precizně řízený průběh detonace a dynamiky pohybové hmoty. Lineární motor s volnými písty využívá pohyb společné hřídele, na které je usazen lineární elektrický generátor [129], nebo hydraulický píst usazený na společné hřídeli, jež pohybem pístu vytváří hydraulický tlak, dále využívaný [126]. Lineární spalovací motor, v porovnání s rotačním provedením se setrvačnými hmotami, má díky minimu hmotnosti pohyblivé části vysokou účinnost přeměny energie dynamiky expandovaných plynů. Je publikováno několik studií zabývajících se řízením motoru s hydraulickou pumpou [125] a jsou doplněny analýzou numerických modelů například ve studii [127].

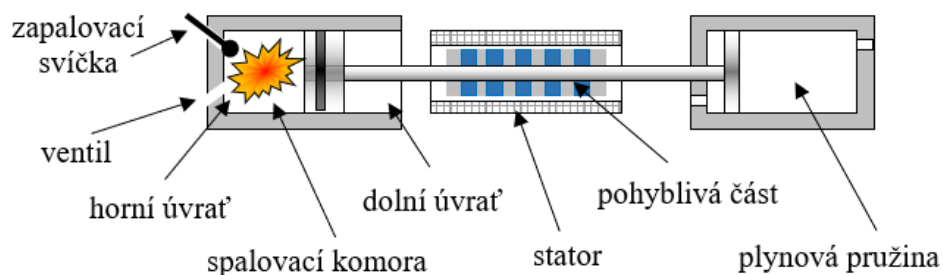
Z řady publikovaných prací zabývajících se návrhem a testováním lineárního motoru ve spojení s elektrickým generátorem je možné uvést příspěvek z univerzity v Západní Virginii [106], ve kterém

je uvažováno jeho využití i pro generátor elektrické energie s aplikací pro relativně vzdálená místa a to díky menšímu množství pohyblivých částí, větší spolehlivosti zařízení, účinnosti transformace a kompaktnosti celého zařízení [50] v porovnání vzhledem ke konstrukci motoru s rotačním pohybem převodu mechanické energie. Podobnými návrhy využití lineárního motoru jako zdroje energie, výsledného provedení generátoru elektrické energie se také zabývají autoři prací [53], [64], [68], [80], [90], [94]. Jejich aplikační oblast je zaměřena na alternativy současných benzínových nebo naftových generátorů. Jedno z možných rozdělení lineárních generátorů podle [131] je na obr. 2.



**Obr. 2** Přehledové rozdělení lineárních generátorů [131].

Potenciální oblastí využití generátorů s lineárním pohybem ve spojení se spalovacím motorem s volnými písty je doprava a to osobní automobilová technika. Základními prvky koncepce lineárního generátoru je spalovací jednotka s lineárním uložením a pohybem pístů neboli motor s volnými písty (free piston engine) a lineární generátor transformující pohybovou energii na elektrickou (linear generator). Dále pak spalovací komora, která je opatřena ventily (viz obr. 3). V této komoře se pohybuje



**Obr. 3** Princip lineárního spalovacího motoru v kombinaci s elektrickým generátorem [132].

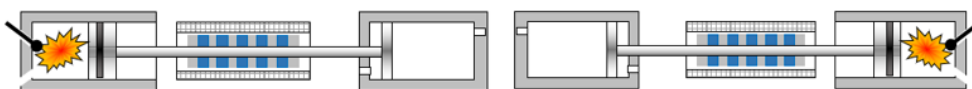
píst, který je spojen přes pístnici (společnou hřídel) s pístem na protilehlé straně fungující jako vzduchová pružina (gas spring). Uprostřed pístnice je umístěn elektrický generátor sestávající se z pohyblivé části upevněné na hřídeli (rotor) a pevné části uchycené na bloku spalovacího motoru (stator). Vzhledem k tomu, že zde není kliková hřídel se setrvačnickem a ojnicí, která převádí posuvný pohyb pístu na rotační, působí zde zmenšené/minimální setrvačné síly. Tato sestava neakumuluje energii do setrvačných hmot pohyblivé části a dosahuje tak vysoké účinnosti přeměny na jinou formu (elektrickou), jak je patrné z relace (1).

$$m \ddot{x} + l_c \dot{x} + kx = F_{em} + F_{mech} + F_{alt}, \quad (1)$$

kde  $m$  je hmotnost pohyblivé části tělesa,  $a$  je zrychlení tělesa,  $l_c$  je koeficient tlumení pohybu tělesa (setrvačnost pohybových jednotek apod.),  $v$  je okamžitá rychlost tělesa,  $k$  je koeficient tuhosti soustavy (představuje tření při pohybu tělesa apod.),  $F_{em}$  jsou síly pohybující tělesem získané transformací elektromagnetické energie,  $F_{mech}$  jsou síly pohybující tělesem získané transformací mechanické energie,  $F_{alt}$  jsou síly pohybující tělesem získané transformací dalších zdrojů energie. Potom lze relaci (1) upravit na bilanci energie jako

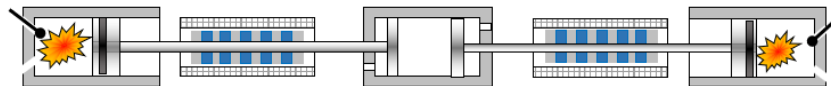
$$\int (m a + l_c v + k x) dv = \int (F_{em} + F_{mech} + F_{alt}) dv \quad (2)$$

Sestava s lineárním motorem je pak jen náročná na přesné řízení spalovacího procesu. Píst ve válci je v horní úvratí (top dead center) nejbliže ventilům a naopak v dolní úvratí (bottom dead center) při stlačení protilehlého pístu tvoří plynovou pružinu. Principiálních uspořádání lineárního spalovacího motoru s lineárním elektrickým generátorem je několik. Lineární motor s generátorem s jedním pístem ve válci a jedním pístem jako plynovou pružinou je zobrazen na obr. 3. Místo plynové pružiny může být použita i pružina mechanická. V tomto režimu pracuje spalovací motor jako dvoudobý, na obr. 4 je umístění dvou samostatných jednotek proti sobě, aby se tak kompenzovaly vznikající vibrace.

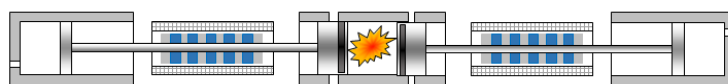


**Obr. 4** Základní princip dvou samostatných jednotek lineárního spalovacího motoru s jednou spalovací komorou a plynovou pružinou [133] s kompenzací vibrací.

Další varianta uložení spalovací jednotky spočívá v umístění dvou samostatných pístů ve válci, kde ve středové části se společnou plynovou pružinu tvoří jeden blok (viz obr. 5). Spalovací válce jsou v krajních částech motoru, při chodu se pohybují písty protiběžně.

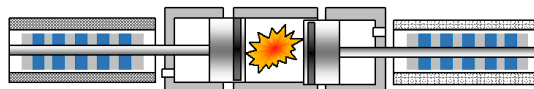


**Obr. 5** Základní princip dvou samostatných pístů ve válci se společnou plynovou pružinou uprostřed [133] v protiběžném chodu.



**Obr. 6** Základní princip lineárního spalovacího motoru s centrální spalovací komorou uprostřed [133].

Záměnou spalovacího a pružinového válce se dostane konfigurace, u které jsou umístěny na krajích plynové pružiny s jedním spalovacím válcem ve středu bloku motoru (viz obr. 6). Tato varianta opět kompenzuje vibrace.



**Obr. 7** Základní princip lineárního spalovacího motoru s centrální spalovací komorou a integrovanými plynovými pružinami [133].

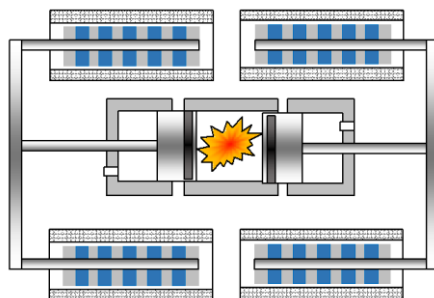
Změnou konstrukce tlumení se získá varianta z obr. 7. Písty jsou proti sobě umístěny ve spalovacím válci a jejich zadní část se pohybuje v uzavřené části válce tvořící pružinu. Další konfigurace se liší uspořádáním elektrického generátoru podle způsobu získání dynamického pohybu pístu.

Například na obr. 8 jsou na společné pístnici uspořádány na protilehlých stranách písty pracující ve spalovacím válci. Při expanzi v jednom válci dochází ke kompresi v opačném válci a naopak. Jeden z válců stále pohání elektrický generátor uprostřed.

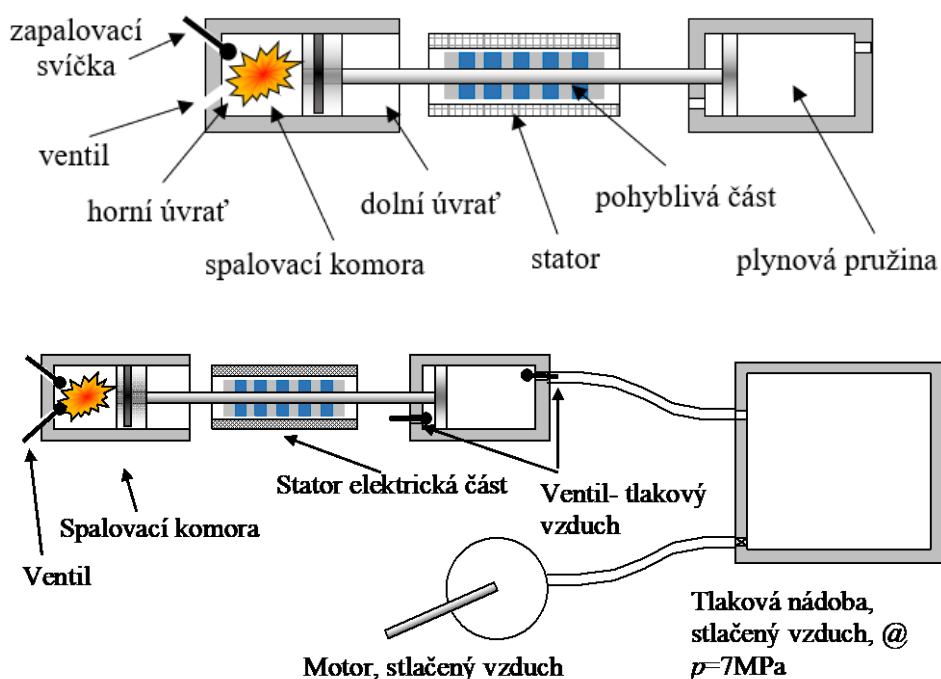


**Obr. 8** Základní princip lineárního spalovacího motoru se spalovacími komorami na protilehlých stranách [132].

Další složitější systém, který využívá účinněji dosažené dynamické parametry lineárního motoru je na obr. 9. Ve středu válce dochází ke spalování paliva a vývinu tlaku na písty, kraje válce fungují jako pružina. Zkrácení celého bloku lze umístěním cívek po bocích.



**Obr. 9** Základní princip lineárního spalovacího motoru s centrální spalovací komorou a rozvětvením lineárních generátorů do stran [133].



**Obr. 10** Princip lineárního spalovacího motoru v kombinaci s elektrickým generátorem a převodu energie do stlačeného vzduchu.

Principy získávání energií lze kombinovat s více efekty, jak získání, tak uchování energie. Zajímavým řešením je uchování energie do stlačeného vzduchu [41]. Nabízí se možnost přímé akumulace u spalovacího lineárního motoru jako druhotný efekt (harvesting) při brzdění pístu (viz obr. 10). Jak bylo výše uvedeno, může toto řešení elegantně posunout problém řízení detonace a brzdění pohyblivé části motoru do neúčinného stlačování vzduchu dále do vysoce efektivní akumulace energie pomocí vysokotlakého čerpadla.

Použití lineárního motoru s generátorem může být zajímavé ve vozech typu tzv. sériový hybrid [51], [54], [56–57], [59–61], [65], [85], [88], [105], [115–116] [136], [133] ve kterých lineární motor s generátorem trvale pracuje a dodává elektrickou energii pro pohon vozidla přímo do elektromotoru a

akumulátoru s relativně malou kapacitou. Další aplikací je nasazení systému jako prvku pro prodloužení dojezdu vozidla (tzv. range extender) [52]. Shrnutí některých z nedávných vývojů pro komerční použití především v hybridních pohonných jednotkách najdeme v [138].

Požadavky na lineární elektrický generátor plynoucí ze základní analýzy lineárního motoru s generátorem s ohledem na výstupní výkon pro nabíjení trakční baterie 21 kWh a elektrický pohon s výkonem 80 kW je publikován v práci [62].

Další publikované práce se zabývají řešením nasazení lineárního generátoru pro konverzi mechanických vibrací automobilu na elektrickou energii [55], hodnocením výkonu a kvality lineárního mikrogenerátoru včetně testování pro využití energie z vln a pro motor s volnými písty se zabývají autoři práce [63].

Členěním lineárního motoru s generátorem na tři hlavní subsystemy a následně řešení návrhu a parametrů každého z nich se zabývá práce [134]. Subsystemy se skládají ze spalovací části lineárního motoru přeměňující chemickou energii na kinetickou, z lineárního generátoru přeměňující kinetickou energii na elektrickou a ze vzduchové pružiny jako prvku uchovávající energii a měnící pohybové vlastnosti pístu. Podobně k řešení přistupují i autoři práce [114], ve které se taktéž zabývají odděleně jednotlivými částmi systému.

Dále návrhem spalovací části lineárního motoru a lineárního generátoru pro spalování vodíku jako média s vysokou hustotou koncentrace objemové energie se zabývá práce [108], ve které kromě vodíku  $H_2$  je možnost spalování směsi vodíku a bioplynu. Princip spalovacího motoru je uvažován jako vznětový s homogenním naplněním spalovacího prostoru (Homogeneous Charge Compression Ignition - HCCI). Výhodou principu HCCI je použití chudých výbušných směsí. Cílem tohoto kroku je snížení tvorby  $CO_2$ , zefektivnění transformace energie a snížení zátěže získáním vodíku z obnovitelných zdrojů jako náhrada za klasická fosilní paliva. Numerickým návrhem a modelem, analýzou lineárního motoru s generátorem (Free Piston Linear Generator – FPLG) pro spalování vodíku se zabývá [92].

Simulace pomocí Matlab/Simulink a metodou konečných prvků (FEM) je využita pro návrh lineárního motoru s alternátorem (Free Piston Linear Alternator – FPLA) a je popsána v práci [109]. Studii návrhu generátoru s numerickou simulací charakteristik hoření a nalezení limitů zapalování pro motor s volným pístem se zabývají autoři práce [110]. Dále se numerickým modelováním, analýzou spalování a procesu jiskrou zapalovaným FPLG, porovnáním výsledků z testů zabývá skupina z Univerzity v Newcastle a Beijing [111]. Podobná skupina se zabývá několika dalšími pracemi. Je to práce se zaměřením na stabilní chod lineárního motoru a elektrické charakteristiky generátoru opět s využitím simulací a porovnání s naměřenými výsledky z experimentu [112]. Zkoumání potenciálních poruch při chodu motoru jako vynechání jiskry při zapalování, kolísání jednotlivých cyklů motoru a okamžitá změna elektrického zatížení přináší práce [139]. Zkoumání provozních charakteristik FPLG během každé fáze provozu na základě výsledků simulace a experimentu je publikováno v práci [89]. Celkové řízení s návrhem pro stabilní chod lineárního motoru a s využitím kaskádového řízení a PID (proportional-integral-derivative) řídicích jednotek je uvedeno v práci [113], podobně [117]. Zlepšení výstupního výkonu díky řízení o 7–10 % přináší text příspěvku [120], problematiku rezonančního řízení řeší autoři práce [119].

Podobně, zaměřením na experimentální analýzu charakteristik spalování a uvolňování tepla při použití naftového motoru s volným pístem, řeší práce [91]. Shrnutí návrhu a řízení FPLG s ohledem na různé typy lineárních generátorů, popis jejich výhod a nevýhod přináší text [121], celková analýza spalovacího motoru a lineárního generátoru je uvedena v práci [124]. Zkoumání efektivity při použití spalovacích komor na obou stranách lineárního motoru místo vzduchové pružiny na jedné straně najdeme v textu [118] a rozsah teoreticky dosažitelný u pomaloběžného generátoru je uveden v práci [122].

#### **a. Oblast návrhu pouze spalovací části motoru**

Základní koncepce způsobu přeměny energie je závislá na použití a návrhu dvoudobého lineárního spalovacího motoru [86],[87] nebo čtyřdobého [84].

Některé práce se zabývají návrhem, analýzou nebo modelováním především spalovací části systému s lineárním motorem a generátorem [98], [102], termodynamický model lineárního spalovacího motoru je publikován v práci [104]. Parametrická analýza dvoupístového lineárního motoru je uvedena v textu [97], pomocí jednoduchého numerického modelu demonstrují vlastnosti návrhu, který je redukován na nucený vibrační systém hmota–pružina pod vnějším buzením [93]. Analýza numerického modelu studie se spirálovou pružinou s vysokou tuhostí je dostupná [99], modelování a řízení generátoru

s volným pístem je popsáno v textu [101], simulace dvoudobého motoru s volnými písty je v práci [107]. Další oblastí výzkumu a řešení spočívá v nalezení zajištění stabilního chodu lineárního motoru [103] a jeho odpovídajícím/optimálním řízením [100].

Využití lineárního Jouleova motoru v kombinaci s lineárním generátorem je uvedeno v práci [95] a jejich charakteristiky s ohledem na suché třecí síly jsou diskutovány v textu [96].

### **b. Oblast návrhu čistě elektrické části**

Jako specifický segment výzkumu u uvedeného typu generování elektrické energie je řešení návrhu elektrické a elektromagnetické části zařízení. Základní a detailní analýzou konceptů lineárních strojů vhodných pro použití v lineárních motorech, jejich konceptů z hlediska geometrie (planární nebo tubulární) najdeme v práci [74]. Využití 3D modelování a simulace a následně srovnání s experimentem k prostudování lineárního generátoru opět v provedení planárního nebo tubulárního je zpracována autory práce [78]. Generátory mohou být v provedení jednofázovém [82] v tubulárním uspořádání nebo planárním uspořádání [81]. Porovnání lineárního generátoru jako lineárního synchronního stroje a lineárního stroje s příčným tokem je v práci [77]. Porovnání a variace parametrů jako například délky statoru a rotoru vůči sobě s ohledem na hustotu výkonu je zaznamenáno a analyzováno v práci [76]. Analýza a experiment snížení zadržovací síly s ohledem na tvar použitých permanentních magnetů zahrnuje práce [75]. Jednotlivými dílčími problémy, zkoumáním nebo simulací se zabývá např. [71] a dále přináší závěry výzkumu miniaturizace, návrhu válcovitého dvojitého statoru a zlepšením hustoty magnetického toku v mezeře. Studium radiálních a axiálních magnetů pomocí ANSYSu se zabývá [70], simulací a experimentálním ověřením ekvivalentních obvodových parametrů a ztrát v jádru pomocí FEMM [79], vliv výkonového měniče na konstrukci lineárního alternátoru zahrnuje práce [69], vyhodnocení dojezdu lineárního motoru s generátorem řeší práce [72], zkoumání vlivů a parametrů síly od pólových nástavců na pohybující se jádro generátoru popisuje text [66] a jejich řešení práce [67] nebo zjednodušený analytický model popisuje práce [73].

### **c. Generátory získávající energii z moře**

Generátory získávající elektrickou energii z moře velmi často využívají posuvný (lineární) pohyb namísto rotačního, což je dáno principem přirozeného pohybu povrchové vlny u mořských vln. Využívají se různé mechanické konstrukce na převod pohybu vlny na jednoosý směr pohybu [150] nebo do více směrů, např. až šestiosý generátor [151] s návrhem ukládání stejnosměrné elektrické energie do baterií a s konvertorem DC/AC do střídavé elektrické sítě. Tyto mechanické konstrukce měnící energii vln na lineární pohyb jsou v základu popsány v práci [152] a následně i typy lineárních generátorů použity v těchto převodnicích energie z vln. Zásadním parametrem jsou podmínky, které posouvají realizaci generátoru směrem k získání energie při napětí a proudu, který se mění jak ve frekvenci  $f_g$ , tak i v amplitudě  $U$ ,  $I$  a také sled fází se neustále střídá, což vede k výrazně vyššímu poměru špičkového výkonu vzhledem k průměrnému dodávanému výkonu [152].

Jedno z podrobných členění lineárních generátorů pro využití převodníků energie z vln pohybující se hladiny je zpracováno v publikaci [153] Přehled převodníků pohybové energie vln vodní masy energie s (Wave Energy Converters) s odpovídajícími typy elektrických generátorů je publikován v pracích [154–156]. Podle studie [157], energie vln poskytuje 15–20 krát více energie na metr čtvereční ( $w$  [ $J \cdot m^{-2}$ ]) než dosud využívaná větrná či solární energie.

Konstrukce lineárních elektrických generátorů, které se používají při přeměně energie pohybu vln vodní masy na posuvný pohyb využívají nejčastěji známé konstrukce trubkového generátoru s kruhovým uspořádáním magnetů [158], [159] nebo s plochou strukturou [160], [161]. Jsou zde i netradiční typy s modulárním statorem a dvojitou pohybovou částí [162] nebo polem modulovaný lineární generátor s příčným tokem média (a field-modulated transverse flux linear generator) [163]. Je známa také koncepce zařízení využívající pohyb masy uspořádáním tělesa přímo v kontaktním uložení a na vlnách ležící konstrukce využívající přílivového proudu s generátorem s několikavrstvým Halbachovým polem permanentních magnetů [164]. Složitější konstrukce inspirovaná „pohárkem na vlnách“ je název (tumbler-inspired electromagnetic generator) s Halbachovým polem byla nejprve simulovaná a poté změřená s výstupním napětím  $U = 3$  V a frekvencí  $f = 2,6$  Hz s průměrným výkonem  $P_{out} = 65$  mW, což by mohlo například postačovat na napájení bezdrátového senzoru [165].

Různé odborné publikace a práce se pak zabývají analýzou, optimalizací a testováním lineárních generátorů využívající energii mořských vln [166–168].

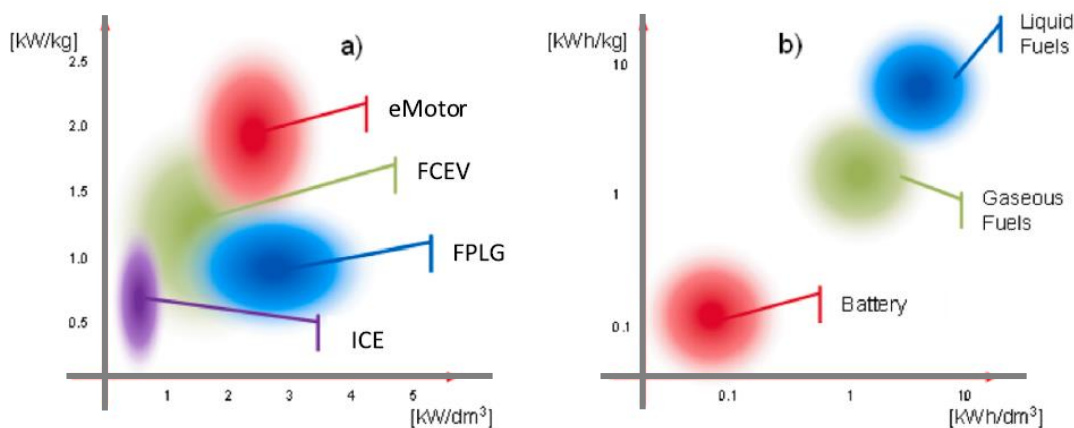
#### d. Srovnání, analýzy, studie vazeb generátoru

K uvedené problematice způsobu transformace energie, harvestingu, se vztahují i obecnější práce, které obsahují porovnání, např. s jinými technologiemi jako je mikroturbína, palivový článek, rotační spalovací motor [132], jako známé řešení harvestingu a generování elektrické energie nebo porovnání výstupního výkonu  $P_{out}$  v závislosti na změně provozních parametrů [135]. Dále lze nalézt studie zabývající se různým použitím alternativních paliv pro spalovací systémy, jako je například propan-butan [137], ropné produkty různých frakcí [146], FlexiFuel s přídavnou turbínou na výfuku [140].

Zjišťování vlivu konstrukce generátoru na účinnost motoru a představení techniky redukce síly pólových nástavců publikovali autoři [141]. Jedna ze starších dizertačních prací z univerzity v Západní Virginii je zaměřena na optimalizaci střídavého lineárního alternátoru s permanentním magnetem pro použití ve spojení s lineárním spalovacím motorem [142]. Poměrně rozsáhlá práce skládající se ze tří částí pocházející z výzkumného a vývojového centra Toyoty je rozdělena na výzkum základních charakteristik zdroje energie, přináší výsledky výzkumu návrhu řídicího systému pro generátor a uvádí novou metodu řízení lineárního generátoru pro zvýšení účinnosti a stability systému [143–145]. V Německém středisku pro letectví a kosmonautiku v institutu (EADS) koncepcí vozidla bylo vydáno několik prací z diskutované tematické oblasti. Práce zabývající se konceptem, vysvětlením, vývojem a měřením výsledků lineárního generátoru se spalovacím motorem s volnými písty a integrací do vozidla jsou zveřejněny například v textu [147] a podobně i [148]. V přístupu analýzy a řešení zdroje energie se uplatňuje dělení na pohonné ústrojí, elektrický generátor, použití nebo ukládání elektrické energie.

##### Pohonné ústrojí

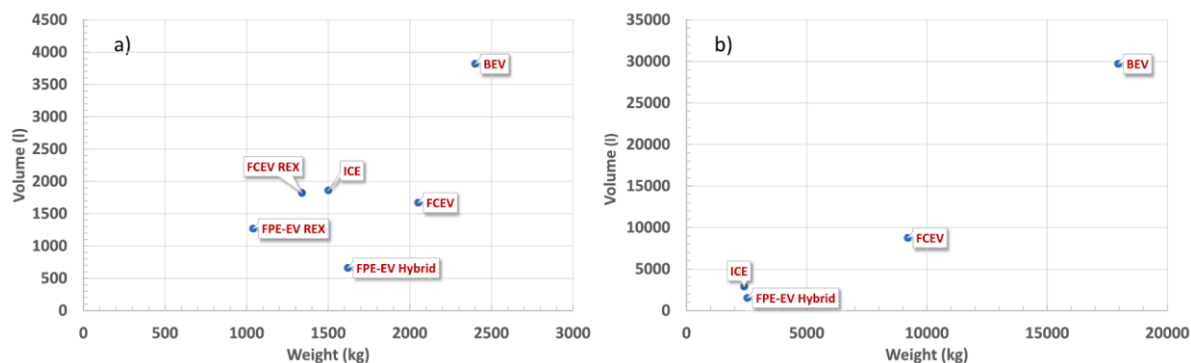
Pro účinnost celého systému transformace energie je výhodné mít představu o účinnosti jednotlivých prvků. V porovnání pohonných jednotek, [149], z hlediska objemové hustoty výkonu  $p$  [ $W/m^3$ ] vychází rozdílné hodnocení výhodnosti použití generace energie. Například proti běžnému spalovacímu motoru (ICE – Internal Combustion Engine), vodíkovému palivovému článku (FCEV – Fuel Cell Electric Vehicle) a vozidlu s elektrickým motorem (eMotor) nejlépe lineární spalovací motor s generátorem (FPLG – Free Piston Linear Generator) je vhodnost nasazení rozdílná, ale racionální. Hustota měrné energie  $w$  [ $W \cdot s/m^3$ ] a její následné využití u vodíkových systémů je nižší než u organických kapalných paliv, jak je ukázáno na obr. 11.



**Obr. 11** Porovnání současných technologií generování energie hnacího ústrojí: a) hustota výkonu  $p_m$ ; b) hustota energie  $w_m$  [149].

Při srovnání pohonných systémů z hlediska objemu a hmotnosti zařízení (vozidla), vychází rozložení efektivity podle obr. 12. Vycházíme při tom z předpokladu, že účinnost přeměny energie pohonného systému využívající plynné/tekuté palivo na pohon je  $\eta = 40\%$  a u pohonu využívající akumulovanou energii z baterie/elektrický motor je  $\eta = 90\%$ , přičemž není zahrnuta účinnost přeměny elektrické energie z jiné formy. Lineární spalovací motor s generátorem (FPLG) vykazuje nižší objem při srovnatelném výkonu (v hybridní i REX konfiguraci) (REX – Range Extender) vzhledem k jiným technologiím pohonu. Je to z důvodů důsledného pochopení pohybové rovnice (1) a (2) díky menšímu

objemu paliva a minimalizaci setrvačných hmot (klikového hřídele). Potom vzhledem k hmotnosti pohonného systému je hybridní konfigurace méně příznivá než ICE nebo FCEV v konfiguraci REX. Důvodem je vysoká hmotnost bateriového bloku, který pasivně zvyšuje hmotnost vozidla, ale stále z tohoto pohledu představuje výhodnější řešení než FCEV a BEV.



**Obr. 12** Porovnání mezi různými pohonnými jednotkami pro dvě různé aplikace: a) nákladní vozidlo (kamion); b) kombajn [149].

### Elektrický generátor

Racionálním parametrem srovnání účinnosti generátorů a jejich transformačních vlastností, je veličina objemová hustota výkonu  $p_g$  [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]. Tímto parametrem lze objektivně a snadno porovnat technickou efektivitu koncipovaného zdroje energie vzhledem k tomu, jak je například uvedeno v tab. 1 u vybraných mikrogenerátorů [27], [169], [177]. Tímto parametrem lze srovnávat rozdílné koncepce, konstrukce, rozměrově rozdílné dokonce nesouměřitelné, provedení generátorů elektrické energie a porovnávat efektivitu principu a řešení.

Výzkum a vývoj technických řešení návrhů vytěžování a transformace energie ze systému nebo soustavy se snaží pomocí parametru objemové hustoty výkonu nebo energie volit účinné a efektivní principy transformace energie. Například holandská firma Kinetron se zabývá vývojem a výrobou přesných elektromechanických výrobků, využívající transformaci pohybové energie na elektrickou pomocí rotačních a lineárních generátorů. Ačkoli nejsou k dispozici standardní výrobky pro přeměnu vibrační energie na elektrickou, přesto se dá říci, že u rotačních generátorů výrobci dosahují výstupního elektrického výkonu  $P_{\text{out}} = 10\text{--}140$  mW, [177].

**Tab. 1:** Porovnání vybraných elektromagnetických mikrogenerátorů [27], [169] a [177].

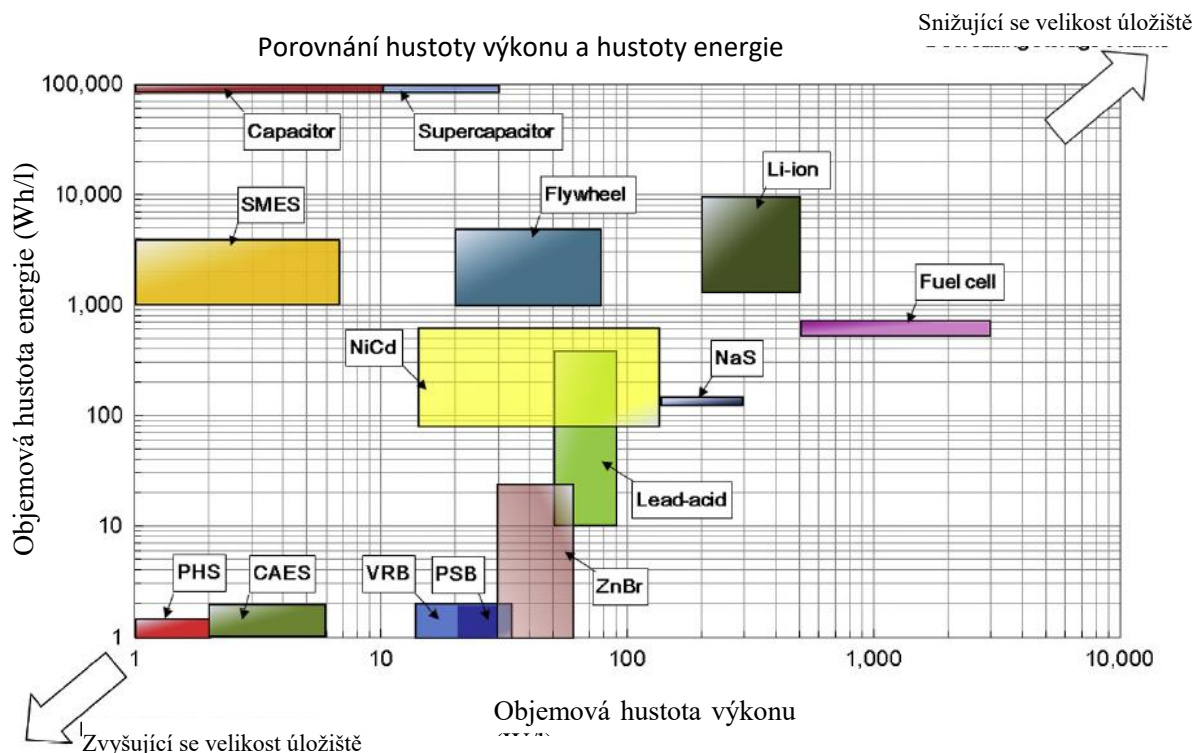
Reference	Typ perm. magnetu	Rozměry/objem generátoru x,y,z [m]	Rezonanční kmitočet $f_r$ [Hz]	Amplituda mech. části A [m]	Výstupní výkon $P_{\text{out}}$ [W]	Výstupní napětí $U_{\text{out}}$ [V]	Odpor zátěže R [ $\Omega$ ]	Zrychlení G $g = 9,81$ [m/s]	Objemová hustota výkonu $p_{\text{et}}$ [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]
Beeby et al. [170], 2007	–	375 mm <sup>3</sup>	52	–	$2 \times 10^{-6}$	0.428 RMS	4000	0.06 g	$\approx 6$
Zhu et al. [171], 2010	FeNdB	2000 mm <sup>3</sup>	67.6–98	$0.6 \times 10^{-3}$	$61.6\text{--}156.6 \times 10^{-6}$	–	–	0.06 g	$\approx 30\text{--}80$
Foissal et al. [172], 2012	FeNdB	A: 108.11 cm <sup>3</sup> B: 40.18 cm <sup>3</sup>	7–10	–	$2.23 \times 10^{-3}$ $2.09 \times 10^{-3}$	3.326–5.770 3.596–5.437	–	0.398–4 g	$\approx 20.6$ $\approx 52$
Munaz et al. [173], 2013	FeNdB	9,043 cm <sup>3</sup>	6	–	$4.84 \times 10^{-3}$	6.6	1000	0.5 g	$\approx 532$
Lee et al. [174], 2012	FeNdB	$1.4 \times 10^{-4}$ m <sup>3</sup>	16	–	$1.52 \times 10^{-3}$	4.8	5460	0.2 g	$\approx 10$
Yang et al., [175], 2014.	–	50 000 mm <sup>3</sup>	22–25	–	$13.4 \times 10^{-3}$	0.7–2.0	110	0.6 g	$\approx 270$
Scherrer et al. [176], 2005	–	9 cm <sup>3</sup>	35	–	$7.0 \times 10^{-3}$	–	–	–	$\approx 778$
MG I [28], 2006	FeNdB	90, 40, 30 mm	20–35	$50 \times 10^{-6}\text{--}400 \times 10^{-6}$	$70 \times 10^{-3}$	4–60 (300) p-p	7500	0.15–0.4 g	$\approx 650$
MG II [28], 2006	FeNdB	50, 27, 25 mm	17–25	$50 \times 10^{-6}\text{--}400 \times 10^{-6}$	$19.5 \times 10^{-3}$	6–15	5000	0.1–0.7 g	$\approx 60$
MG III	FeNdB	50, 25, 25 mm	21–31.5	$50 \times 10^{-6}\text{--}400 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-3}$	1.0–2.5	600	0.05–0.4 g	$\approx 15$
MG IV	FeNdB	50, 35, 25 mm	21–31.5	$50 \times 10^{-6}\text{--}400 \times 10^{-6}$	$8.0 \times 10^{-3}$	1.0–2.5	1200	0.05–0.4 g	$\approx 18$

## Ukládání elektrické energie

Pokud není vyrobená elektrická energie ihned spotřebována, je žádoucí ji v čase posunout na pozdější využití. Zatím se řeší akumulací ve vhodném zařízení. Ukládání nebo akumulace energie je širší technická disciplína a oblast. Vždy se nemusí jednat pouze o akumulaci elektrické energie v její původní formě, ale o její přeměnu na jinou formu a její následné akumulace. To i za cenu ztrát při pozdější konverzi dané energie na potřebnou a to i na elektrickou. Elektrická energie má stále ještě široké využití a nahrazuje zatím jiné formy uložených energií, které byly dosud využívány. Například v dopravě představa elektromobility z 10. let 21. století naznačuje možnost jiného přístupu v dopravě, dále elektrická energie jako hlavní článek nebo mezičlánek nahrazuje fosilní paliva ve vytápění. Skladování přímo elektrické energie nemusí být vždy výhodné, záleží na prvotní formě energie, potřebné délce uskladnění, potřebném dodaném výkonu nebo kapacitě akumulátorů. Vybrané typy úložišť a porovnání jejich charakteristik je uvedeno v tab. 2 [47]. Velikost úložiště a jeho parametry jsou důležité pro volbu aplikace. Proto porovnáním měrné hustoty výkonu a měrné hustoty energie vybraných technologií, například na obr. 11 [47] získáme racionální náhled na způsoby provedení technického řešení. Na obr. 11 v pravém horním rohu jsou kompaktní technologie vyžadující malou velikost, velkoobjemové úložné systémy, nejčastěji stacionární, jsou směrem k levému dolnímu rohu.

**Tab. 2:** Přehled vlastností a parametrů vybraných technologií pro ukládání elektrické energie [47].

Technologie	Objemová hustota energie (Wh/L)	Objemová hustota výkonu (W/L)	Hmotnostní hustota energie (Wh/kg)	Hmotnostní hustota výkonu (Wh/kg)	Jmenovitý výkon (MW)	Jmenovitá kapacita energie (MWh)
Přečerpávací vodní elektrárna	0.5-1.5 [178], 1-2 [184]	0.5-1.5 [178], ≈1 [184]	0.5-1.5 [178]	-	100-5000 [178], 30 [185], < 4000 [194]	500-800 [178], 180 Okinawa PHS [185,191]
Nadzemní (malé)úložiště stlačeného vzduchu	> 2-6 [178,184]	> 0.5-2 [178,184]	140 při 300 bar [198]	-	0.003-3 [186], potenciál ≈10 [199]	≈0.01 [180], ≈0.002-0.0083 [186]
Setrvačnick	20-80 [178,184,195]	1000-2000 [178], ≈5000 [184]	10-30 [178], 5-100 [187], 5-80 [200]	400-1500 [178]	<0.25 [178], 3.6 [188], 0.1-20 [181,201]	0.0052 [188], 0.75 [189], až 5 [201]
Olověná baterie	50-80 [178], 50-90 [189]	10-400 [178]	30-50 [178], 25-50 [202]	75-300 [178], 250 [189], 180 [187]	0-20 [178], 0-40 [182], 0.05-10 [203]	0.001-40 [203] více jak 0.0005 [204]
Li-Ion baterie (litno-iontová)	200-500 [178], 200-400 [184], 150 [189]	1500-10000 [184]	75-200 [178], 90 [189], 120-200 [205]	150-315 [178], 300 [189], 500-2000 [187]	0-0.1 [178], 1-100 [190], 0.005-50 [206]	0.024 [192], ≈0.004-10 [206]
NaS baterie (sodno-sírná)	150-250 [178], 150-300 [184]	≈140-180 [184]	150-240 [178], 100 [216], 174 [217]	150-230 [178], 90-230 [214], 115 [181]	<8 [178], <34 [182]	0.4-244.8 [215], 0.4 [218]
Vanadová redoxní průtoková baterie (VRB)	16-33 [178], 25-35 [183]	≈2 [184]	10-30 [178]	166 [207]	≈0.03-3 [178], 2 [208] možné 50 [179]	<60 [181], 2 [193], 3.6 [209]
Super-kondenzátor	10-30 [178], ≈10-30 [195]	100000+ [178]	2.5-15 [178], ≈0.05-15 [196]	500-5000 [178], ≈10000 [196]	0-0.3 [178], ≈0.3+[184], ≈0.001-0.1 [189]	0.0005 [70]
Vodíkový palivový článek	500-3000 [178]	500+ [178]	800-10000 [178], ≈150-1500 [196]	500+ [178], ≈5-800 [196]	<50 [178], <10 [184], 58.8 [211]	0.312 [210], ve vývoji 39 [212]
Skladování tepelné energie (TES)	80-120, 120-200, 200-500 [178]	-	80-120, 80-200 [178], 150-250 [178]	10-30 [178]	0.1-300 [178], 15 [197], 10 [213]	-



**Obř. 13** Porovnání objemové hustoty výkonu ( $\text{W}/\text{dm}^3$ ) a objemové hustoty energie ( $\text{Wh}/\text{dm}^3$ ) [47].

Zajímavým návrhem řešení zdroje energie, v podobě NGU Power Cell, je generátor elektrické energie s výstupním napětím 12 V a výkonem 100 W. Jedná se o zdroj transformace energie atomů pomocí záření. Opírá se o možnost tvorby elektronových shluků a může být spojena s lokalizovanou vakuovou polarizací generovanou rychlým radiálním přesunem náboje. Vznik těchto hustých elektronových shluků je představen jako pravděpodobný prekursor pro tvorbu proton-elektronových agregátů v pikometrickém měřítku, přičemž je zdůrazněn význam hodnocení věrohodnosti speciálních interakcí elektron-nukleon. Zdá se, že pozorovaná izotopová závislost konkrétní spektrální čáry ve viditelné oblasti spektra E-Cat plazmatu potvrzuje přítomnost specifické interakce protonu a elektronu na elektronovém Comptonově měřítku vlnových délek. To je možné využít k efektivnímu získání elektrické energie [219–221].

### 3. Cíle práce

Podle dostupných publikovaných prací je v oblasti návrhu a řešení elektromagnetického pole v lineárním generátoru pro specifické vnější a okrajové podmínky dynamiky pohyblivé části značný prostor pro návrh vysoce účinné přeměny a dále optimální návrh koncepce uspořádání mechanicko-elektrického generátoru. Proto si výzkum a práce klade za cíl:

1. Navrhnout specifickou koncepci konstrukčně proveditelného lineárního elektrického generátoru pro vysokou účinnost přeměny elektromechanického lineárního generátoru (s vysokou objemovou hustotou výkonu  $p_{\text{efd}}$ ).
2. Navrhnout koncepci podle parametrů pohonné jednotky, která tvoří mechanický lineární pohyb, a upravit ji pro maximální účinnost převodu energie.
3. Na základě teoreticky formulovaného modelu dynamického systému provést návrh a na funkčním vzorku experimentem ověřit. Tyto modely porovnat.
4. Navrhnout základní elektronickou jednotku pro optimalizaci výkonu generátoru.

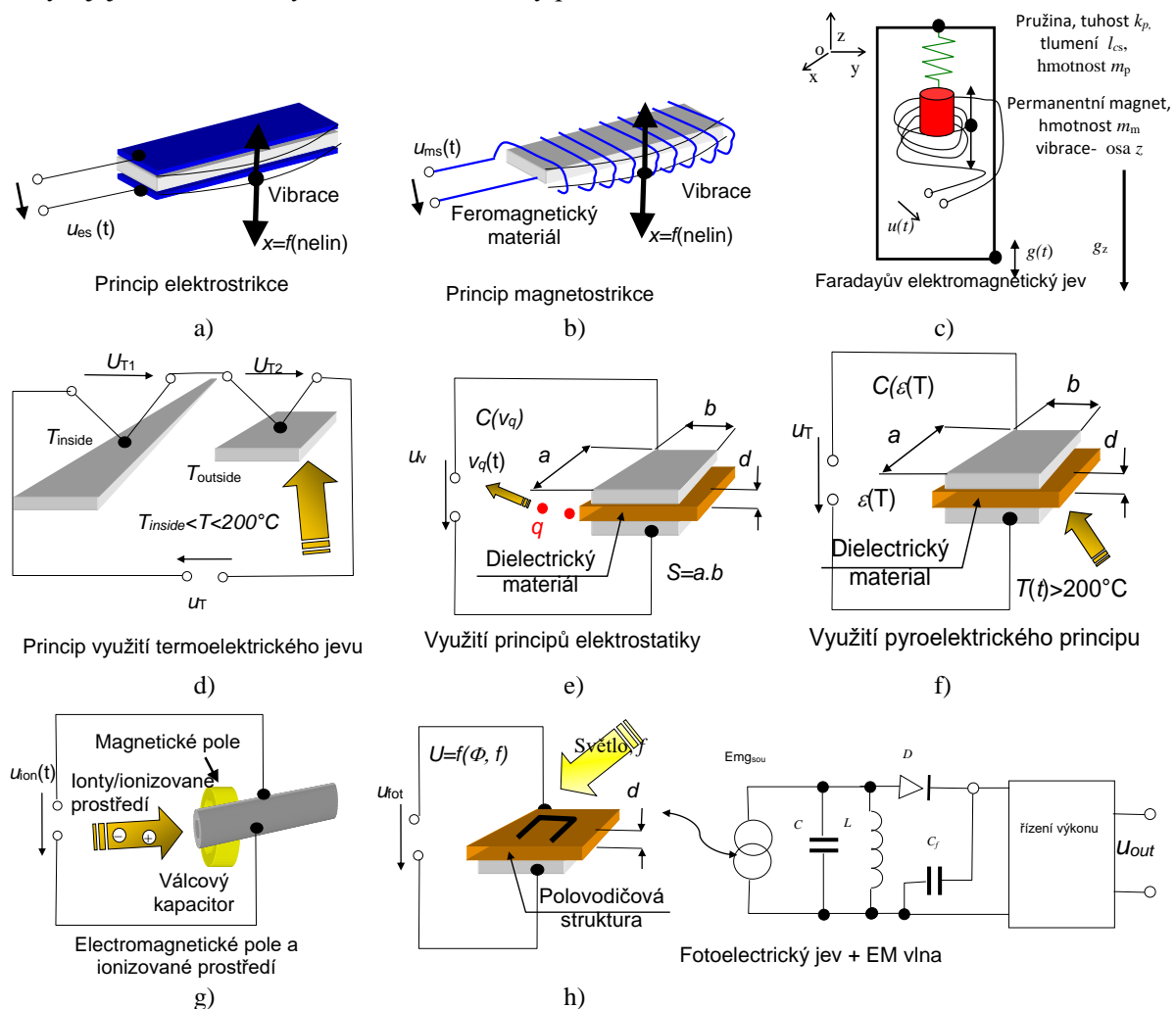
## 4. Koncepce generátorů a využití v „harvestingu“

Pro návrh a vytěžování/transformaci energie můžeme využívat rozdílných efektů z oblasti elektromagnetického pole a elektrohydrodynamiky [222–223]. Každý generátor nebo zařízení pro transformaci energie (harvestor) se skládá ze dvou částí. Tou první je příjem nebo vznik budící energie vstupující do zařízení a pak zařízení, které ji změní na elektrickou. V úvodu této práce byl představen přehled principů vzniku a absorpce energie v zařízeních, doplněný o příklady její následné transformace. Tato část práce se zaměřuje na řešení transformace absorbované energie na elektrickou. Jak bylo uvedeno v cílech práce. V úvodu byla také ukázána metodika hodnocení účinných způsobů transformace.

Principy a zařízení, které transformují energii na elektrickou lze shrnout rámcově do těchto skupin efektů a jevů, obr. 14:

- Piezoelektrický efekt (elektro-strikce);
- Magnetostrikční jev;
- Faradayův elektromagnetický princip;
- Termoelektrický jev (Peltierův, Seebeckův efekt);
- Elektrostatický princip (capacitance);
- Pyroelektrický jev;
- Chemicko-fyzikální efekty pohybu iontů v elektromagnetickém poli;
- Kombinované fotoelektrické efekty.

Jevy a jejich technické využití lze schématicky postihnout a shrnout na obr. 14.



**Obr. 14** Principy transformací energií na elektrickou formu, s potenciálním využitím pro harvesting: a) elektrostrikce; b) magnetostrikce; c) Faradayův elektromagnetický jev; d) termoelektrický efekt; e)

elektrostatický princip; f) pyroelektrický jev; g) generace pomocí pohybu iontů v elektromagnetickém poli (EMHD generátor); h) fotoelektrický jev a transformace EM vlny.

Jako jeden z nejvíce propracovaných a využívaných jevů pro transformaci energie, přichází v úvahu aplikace Faradayova indukčního jevu a jeho precizní využití. Tato zákonitost po vyvození z Maxwellových rovnic lze v integrálním tvaru zapsat jako

$$\oint_{\ell} \mathbf{E}(t) \cdot d\ell = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}(t)}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} + \oint_{\ell} (\mathbf{v}(t) \times \mathbf{B}(t)) \cdot d\ell, \quad (3)$$

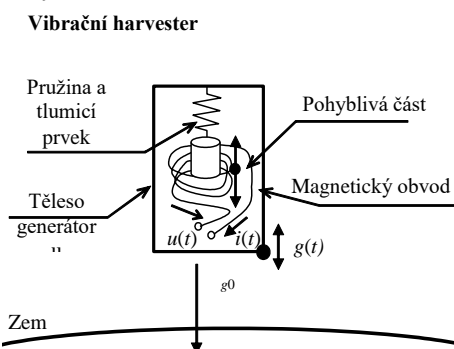
kde  $\mathbf{E}(t)$  označuje vektor elektrické intenzity,  $\mathbf{B}(t)$  je vektor pločné hustoty magnetického toku,  $\mathbf{v}(t)$  je vektor okamžité rychlosti pohybu v systému,  $S$  je plocha oblasti, kterou protéká magnetický tok  $\Phi$ ,  $\ell$  je křivka na hraně oblasti s plochou  $S$ . Na obr. 15 je zobrazena změna magnetického pole, indukce v kruhovém závitě při jeho pohybu v magnetickém poli. Také je zobrazen průběh okamžité hodnoty elektrického napětí na kruhovém závitě. Je zde znázorněn základní princip směrů vektorů pole a pohybu. Závislost elektrického napětí  $u(t)$  lze vyhodnotit pomocí uvedených schémat. Změny uvažují platnost rovnice (3), konfiguraci magnetického toku  $\Phi$  a tvar elektrické cívky s aktivní plochou  $S_c$ .

Aby návrh měl technický a ekonomický smysl, je nutné znát hodnoty energie a rychlosti transformace energie na cílovou formu, viz obr. 15. U uvažovaného principu transformace lze stavovou rovnici definovat s ohledem na zákon zachování energie [222–223]. Potom lze kinetickou energii a potenciální energii  $W_k$  a  $W_p$ , které jsou spojeny s pohybem jádra generátoru, definovat jako

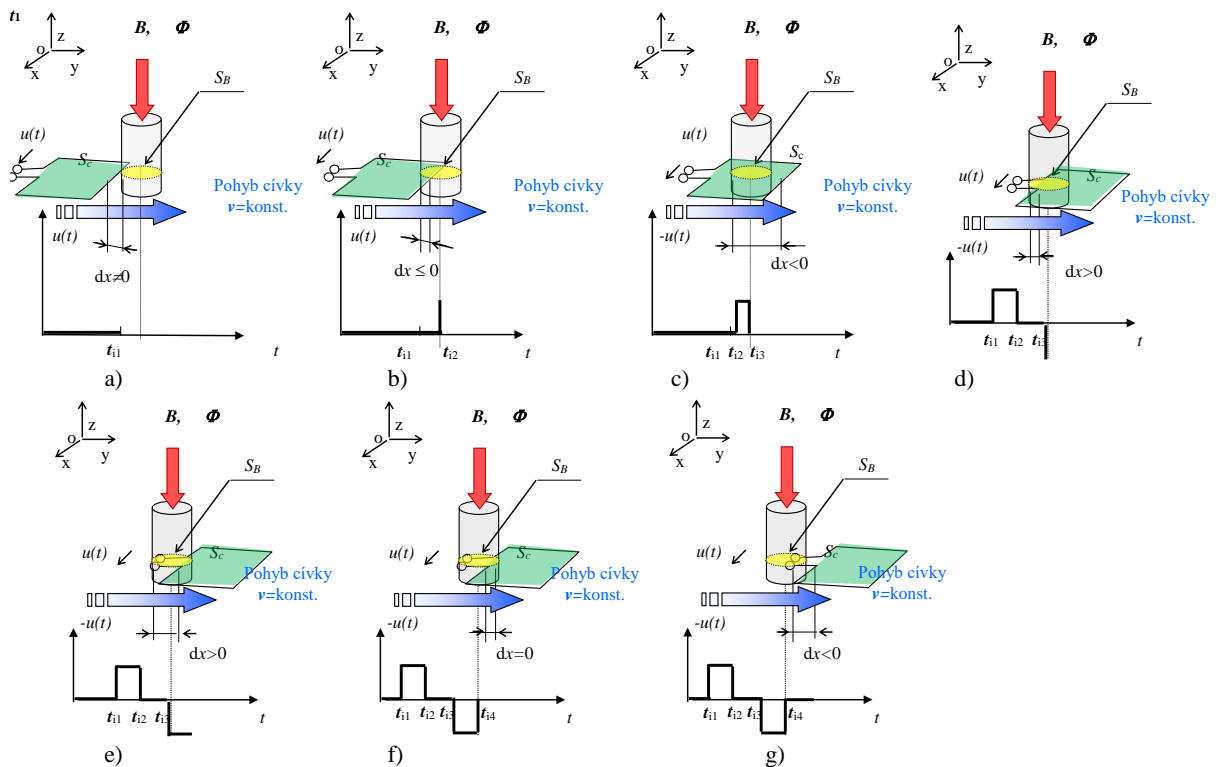
$$W_k = \frac{1}{2} m v^2, \quad W_p = m g x, \quad (4)$$

kde  $m$  je hmotnost oscilačního systému,  $v$  označuje střední rychlost pohybu jádra generátoru,  $g$  představuje gravitační zrychlení,  $x$  polohu nebo změny polohy břemene. Efekt změny magnetického toku a indukce elektrického napětí v uzavřené křivce na povrchu prostoru s tokem  $\Phi$  a plochou řezu  $S_c$  je zobrazeno na obr. 16a–16g. Na obr. 16 je zachycen vývoj elektrického napětí v závislosti na rovnoměrném pohybu magnetického toku a plochy  $S_c$ .

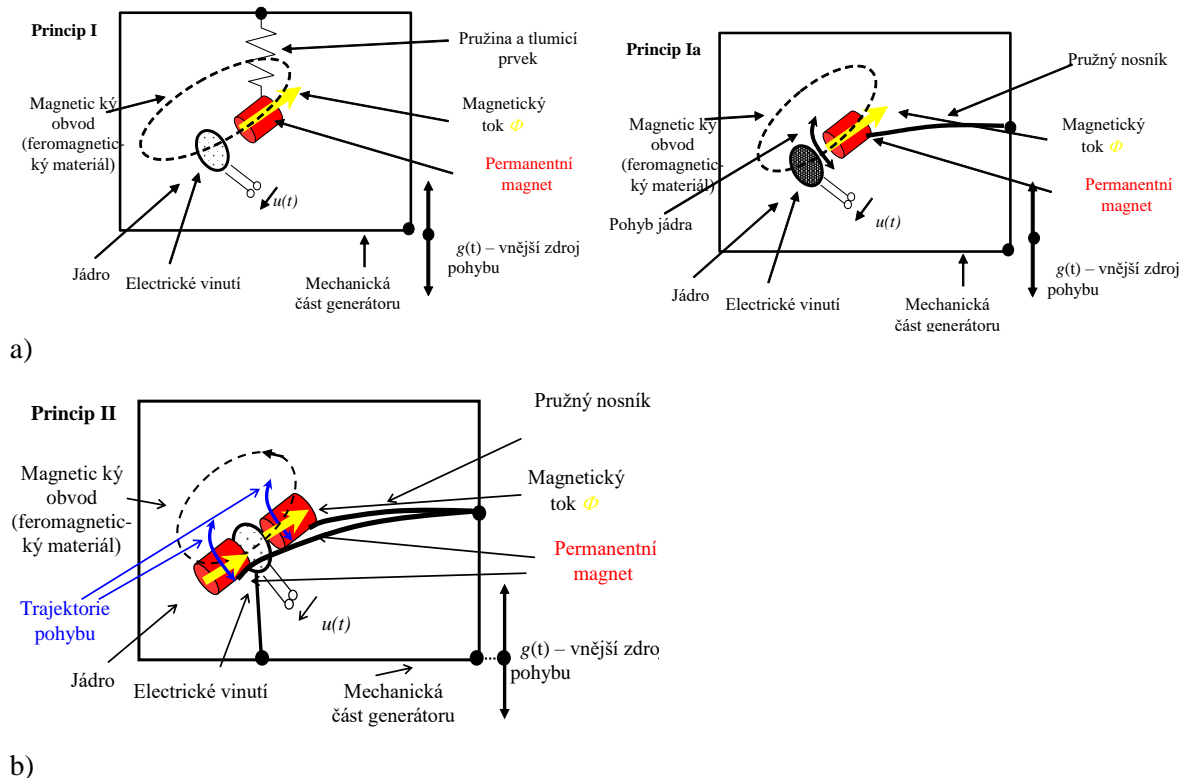
Jak je patrné z obr. 16, je pohyb plochy s magnetickým tokem  $\Phi$  a plochou řezu  $S_c$  vůči sobě relativní, a také na plochu je kolmý. Pokud bude svírat osa toku  $\Phi$  s rovinou plochy  $S_c$  jiný než kolmý úhel, bude se efekt indukovaného napětí v závitě cívky úměrně snižovat. Relativní pohyb lze technicky realizovat v základu dvěma způsoby, viz obr. 17.



**Obr. 15** Principiální model vibračního systému transformace energie pomocí Faradayova indukčního zákona.



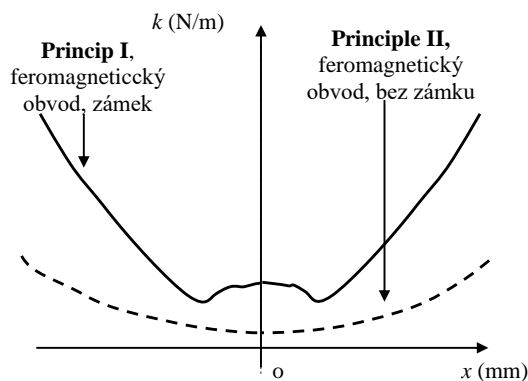
**Obr. 16** Indukce elektrického napětí  $u(t)$  v přilehlé cívce s plochou  $S_c$ : a) až g) podle Faradayova indukčního zákona.



**Obr. 17** Princip uspořádání dosažení indukce elektrického napětí  $u(t)$  v přilehlé cívce s plochou  $S_c$  podle Faradayova indukčního zákona: a) princip s nežádoucím tlumením pohybu; b) princip bez nežádoucího tlumení pohyblivé části.

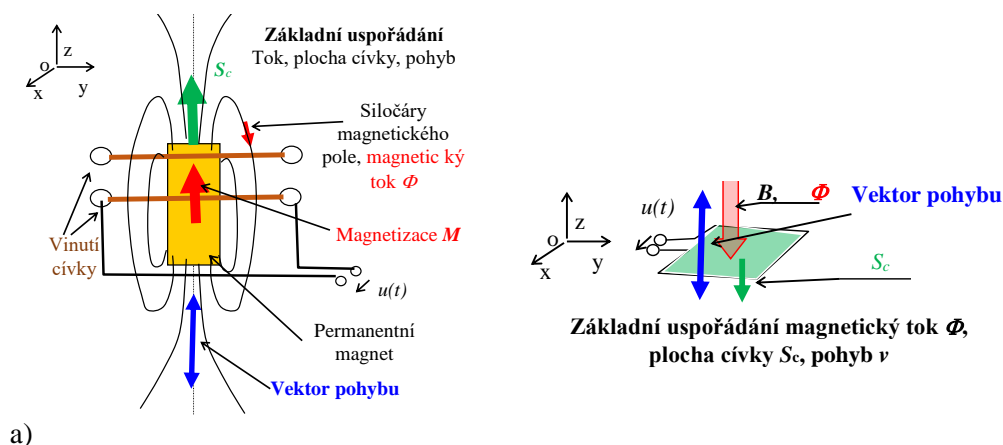
Navržené způsoby uspořádání, viz obr. 17, se na první pohled výrazně neliší. Ovšem pro výtěžení malých amplitud vnějších vibrací se liší výrazně. Princip I a Princip Ia z obr. 17a, je

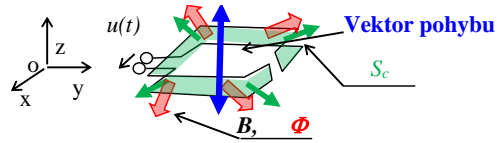
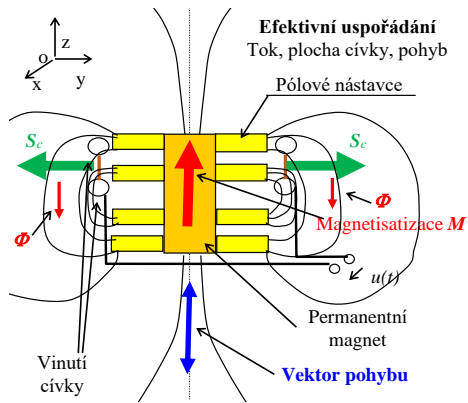
s jednoduchým permanentním magnetem a vnějším magnetickým obvodem uspořádán kolem cívky tak, že při pohybu permanentního magnetu (zdroj magnetického toku  $\Phi$ ) dochází k silovému působení - brzdění pohybu magnetu. Tato charakteristika, výchylka jádra  $x$  a tlumicí koeficient  $k$ , je zobrazena na obr. 18, jak bylo již opublikováno [17], [26–28]. Uspořádání magnetického obvodu z obr. 17b, Princip II je již vhodné pro malé vibrace a je zde odstraněn tlumicí efekt způsobený nastavením konfigurace magnetického obvodu.



**Obr. 18** Změřené tuhostní charakteristiky (nelineární) obou principů magnetických obvodů generátorů.

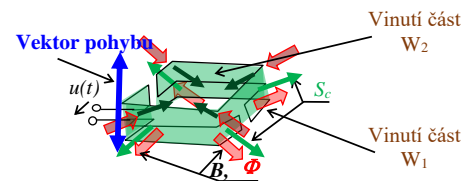
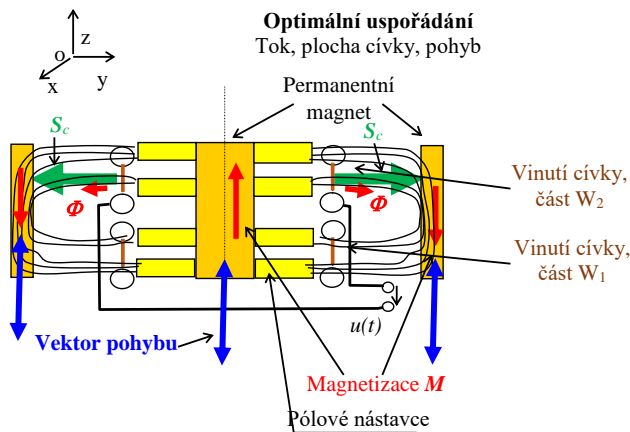
Pokud bychom se zabývali optimálním nastavením vzájemného pohybu pohyblivé části jádra generátoru a vinutí pro získání indukovaného napětí  $u(t)$ , můžeme se vyvarovat základních omylů v řešení, jak je například ukázáno na obr. 19a. Na obr. 19 je několik základních schémat uspořádání vzájemné polohy, pohybu a magnetického toku v jádru generátoru. Při respektování principu dosažení maxima využití Faradayova jevu, obr. 16, získáme uspořádání jádra generátoru z obr. 19b. Je zde respektována poloha směry pohybů vytvářející silnou elektrickou intenzitu  $E(t)$  podle relace (3). Z této relace ale vychází ještě jedna podmínka, a to dosažení maximální změny měrného toku  $B(x,y,z,t)$  podle času. Tomu vyhoví doplněné uspořádání z obr. 19c. Jedná se o optimální nastavení konfigurace, ale nikoliv optimální řešení designu transformačního prvku (harvestoru). Pokud se tedy zaměříme na geometrické uspořádání a koncepci provedení a dosažení maximální změny magnetického toku  $\Phi$ , lze získat základní představy o geometrickém uspořádání a řešení magnetického obvodu, viz obr. 20 pro zemské zrychlení v prostoru 0–2000 m n. m, kde označení  $G = g_{\max}$ .





**Efektivní uspořádání magnetický tok  $\Phi$ , plocha cívky  $S_c$ , pohyb  $v$**

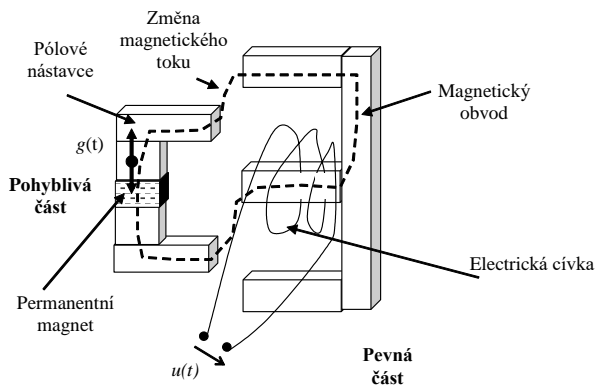
b)



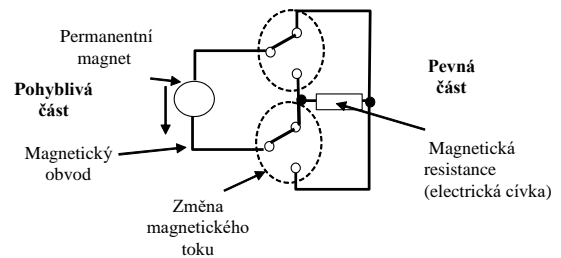
**Optimální uspořádání magnetický tok  $\Phi$ , plocha cívky  $S_c$ , pohyb  $v$**

c)

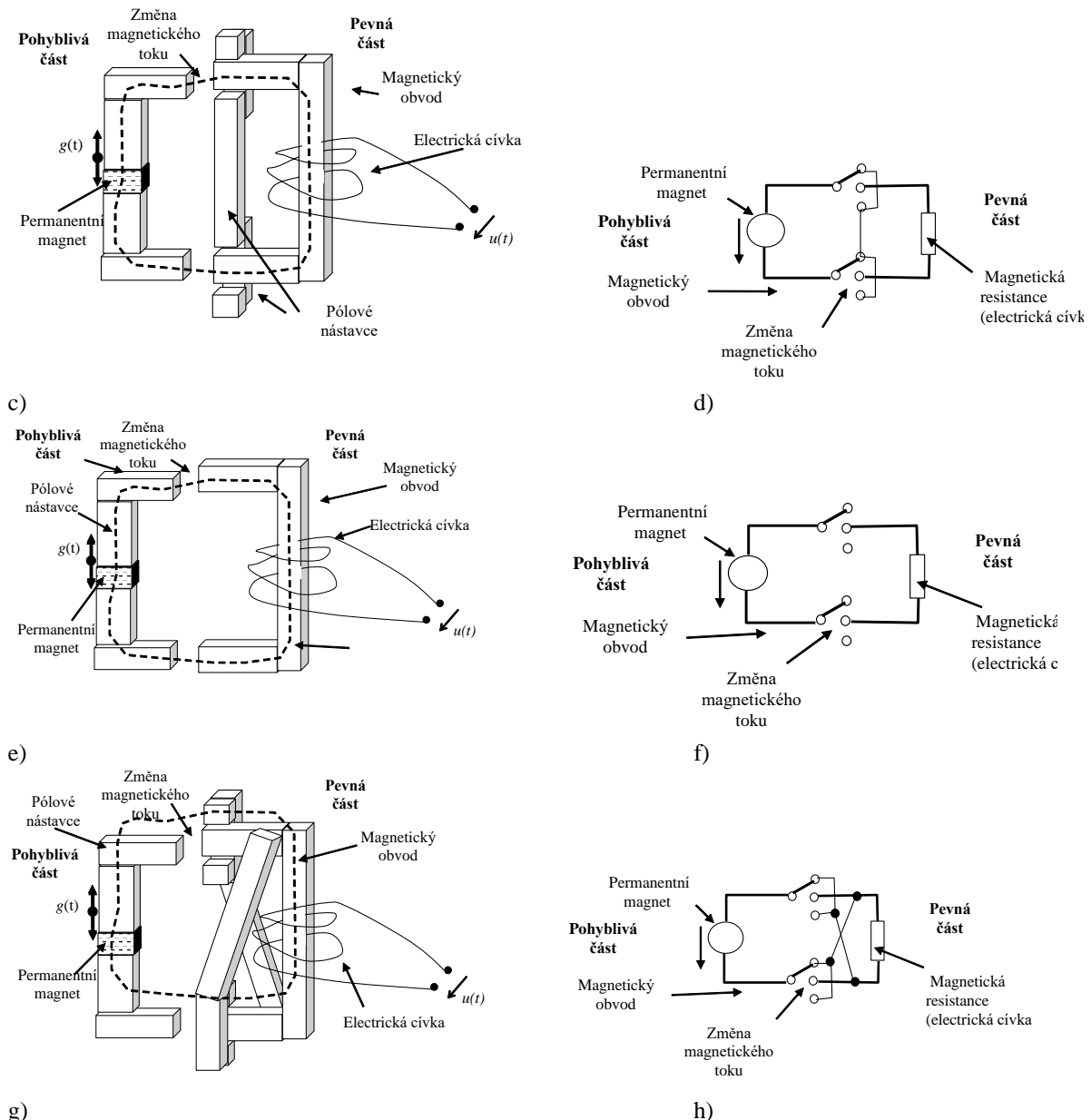
**Obr. 19** Základní uspořádání magnetického obvodu, změny magnetického toku vůči přilehlé elektrické cívce pro využití transformace pohybové energie na elektrickou pomocí Faradayova indukčního zákona: a) podélný tok a jeho podélná časová změna vzhledem k ose cívky vinutí; b) kolmé uspořádání magnetického toku a jeho kolmá časová změna vzhledem k ose cívky vinutí; c) optimální uspořádání kolmého magnetického toku a jeho kolmé časové změny vzhledem k ose cívky vinutí s dosažením maximální časové změny magnetického toku.



a)



b)

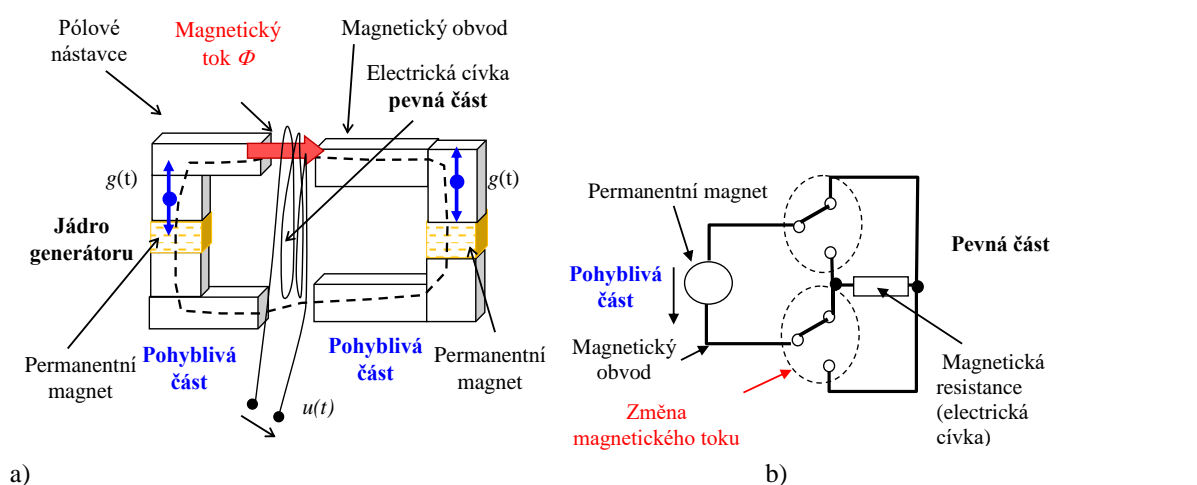


**Obr. 20** Základní konfigurace koncepce jádra generátoru-harvestoru, Princip I s plně feromagnetickým obvodem využívajícím Faradayův indukční zákon: a) konstrukčně jednoduchá, vysoce účinná verze pro zrychlení  $g$  v intervalu 0.2 G – 1.0 G; b) redukováný, konstrukčně jednoduchý, vysoce účinný model pro zrychlení  $g$  v intervalu 0,2 G – 1,0 G; c) verze pro zrychlení  $g$  v intervalu 0.2 G – 1.0 G, citlivá na drobné změny zrychlení; d) zjednodušený model pro zrychlení  $g$  v intervalu 0.2 G – 1.0 G, citlivý na drobné změny zrychlení; e) jednoduchá a snadno vyrobiteľná verze pro zrychlení  $g$  v intervalu 0.2 G – 1.0 G; f) zmenšený model pro zrychlení  $g$  v intervalu 0.2 G – 1.0 G, představující jednoduché a snadno vyrobiteľné řešení; g) struktura pro vysoce účinnou konverzi drobných vibrací s mezními vibracemi 0.1 G a 0.2 G; h) zjednodušený model konstrukce pro vysoce účinnou konverzi drobných vibrací s mezními vibracemi 0.1 G a 0.2 G.

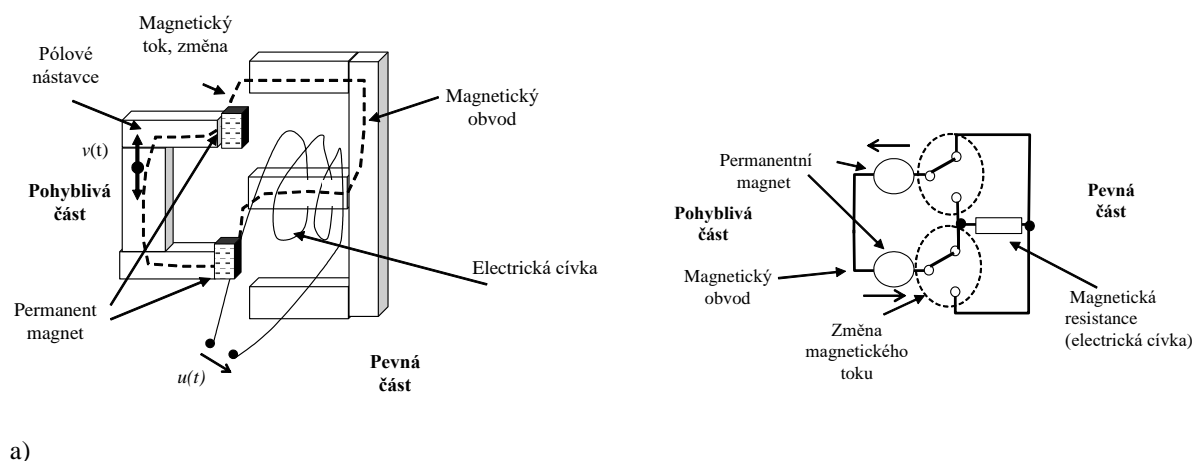
Na obr. 20 je naznačeno několik konfigurací pro základních částí harvestoru, zdroj magnetického pole v podobě permanentního magnetu, magnetického obvodu realizovaného pólovými nástavci a elektrickou cívkou, jako prvkem transformující energii na elektrickou. Na obr. 20a je schéma jednoduchého uspořádání pohyblivé a fixní části s rozpojováním magnetického toku. Schéma se soustředěnými parametry tohoto uspořádání je na obr. 20b. Návrh z obr. 20c je vzhledem k návrhu z obr. 20a výhodnější pro menší rozkmit pohyblivé části. Schéma se soustředěnými parametry této konfigurace je na obr. 20d. Naopak koncepce uspořádání pro větší rozkmit pohyblivé části, než je uspořádání obr. 20a a 20b je na obr. 20e a schéma obr. 20f. Poměrně náročné, ale vysoce účinné zapojení je na obr. 20g. Je vhodné pro malý rozkmit, ale využívá se maximálně změna pohybu a dosahuje se dvojnásobné amplitudy indukovaného napětí  $u(t)$ , jak je snadno patrné z obvodového vyjádření z obr. 20h.

Konfigurace z obr. 20 ale vykazují nelinearitu a výrazné tlumení pohyblivé části výše popsanou a zachycenou na obr. 18 Princip I.

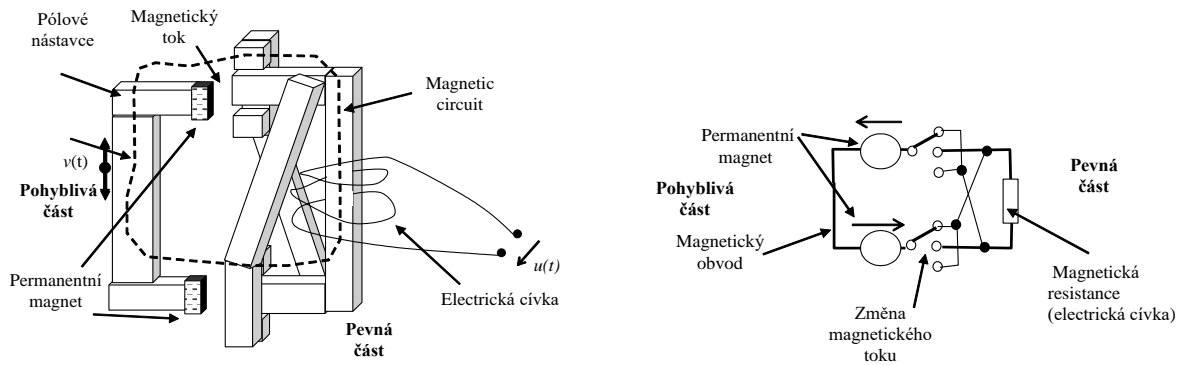
Nelinearitu a výrazné tlumení  $k$  pohyblivé části systému lze u konceptů generátoru z obr. 20 odstranit například úpravou magnetického obvodu, jak je zobrazeno na obr. 21. Jiné zadání se může týkat snížení hmotnosti a v tom důsledku momentu hybnosti pohyblivé části generátoru na minimum nebo zvýšení hodnoty magnetického toku  $\Phi$  či změny magnetického toku  $d\Phi/dt$ . Na obr. 22 je schématicky zachycena změna- zvýšení výsledné elektromotorické síly magnetického obvodu, což ve svém důsledku vede ke zvýšení proudové výtěžnosti generátoru za podobných okolních a počátečních podmínek bez této změny. Jedná se o doplnění permanentních magnetů do magnetického obvodu, což je zřejmé z modelů se soustředěnými parametry obr. 22 v pravé části. Pro dosažení efektivního dlouhodobého vytěžování/generování elektrické energie pohyblivým mechanismem je možné snížit hmotnost  $m$  pohyblivé části jádra generátoru. To lze dosáhnout například jednoduchou změnou v dříve uvedených koncepcích převedením zdroje magnetického pole, permanentního magnetu, na pevnou část. Toto řešení je zobrazeno na obr. 23 v pravé části se schématem obvodu se soustředěnými parametry. Nabízí se také řešení buzení základního magnetického toku pomocí elektrického vinutí. Tato cesta zatím není dále rozpracována. Jako další krok postupu k optimálnímu návrhu struktury generátoru a dodržení minimální hmotnosti  $m$  pohyblivé části jádra generátoru je uspořádání mimo zdrojů magnetického pole se zachováním účinnosti. Taková koncepce je zachycena na obr. 24. A tedy konečná koncepce optimálního uspořádání jádra generátoru je na obr. 25.



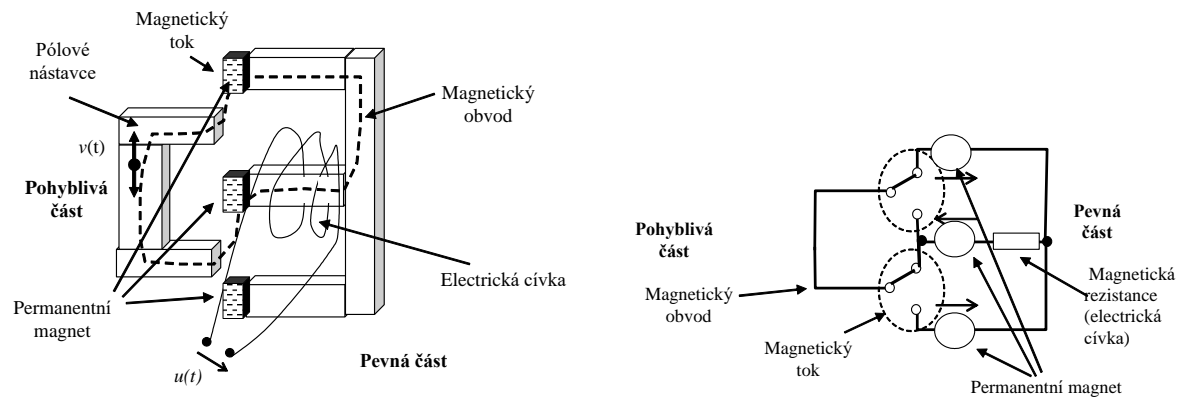
a) **Obr. 21** Jádro generátoru s feromagnetickým obvodem Princip II, využívající Faradayův indukční zákon: a) konstrukčně jednoduchá úprava; b) schéma modelu se soustředěnými parametry.



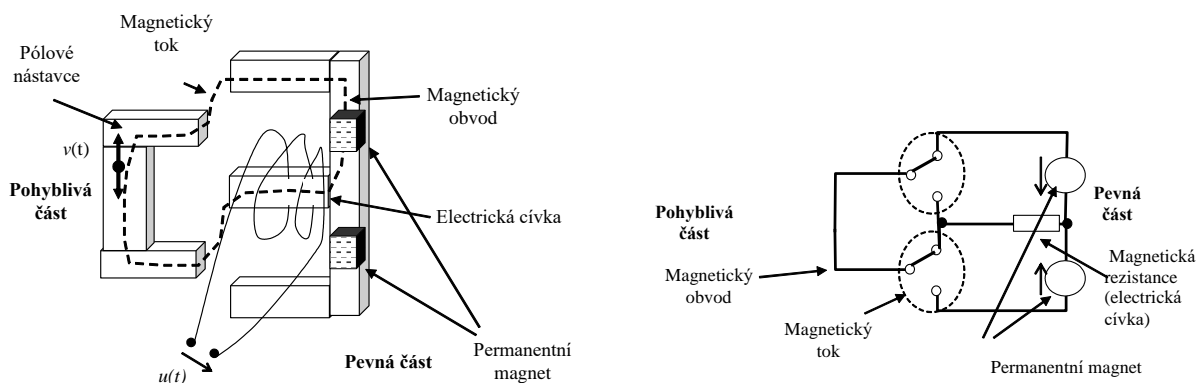
a)



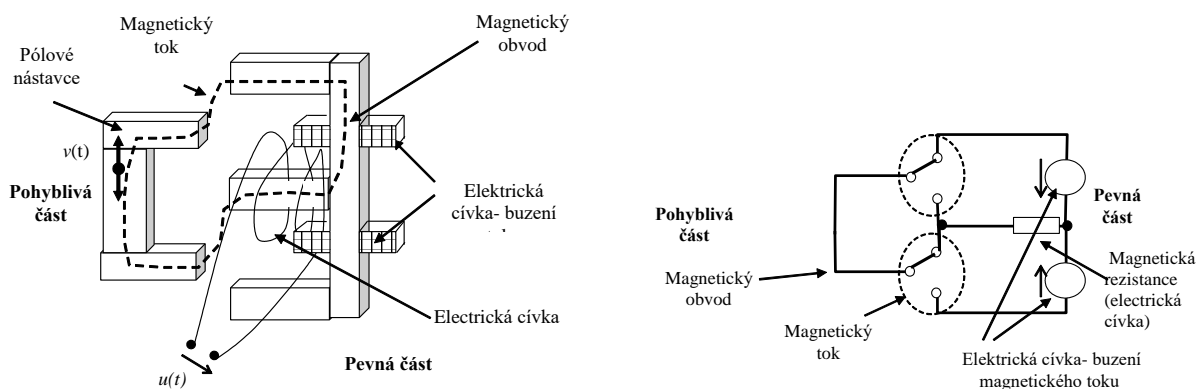
b)  
**Obr. 22** Schéma upraveného uspořádání magnetického obvodu pro dosažení zvýšení změny magnetického toku  $d\Phi/dt$ : a) pro dlouhou posuvnou dráhu; b) pro krátkou posuvnou dráhu.



a)  
**Obr. 23** Schéma uspořádání magnetického obvodu generátoru s minimalizací hmotnosti  $m$  magnetického obvodu jádra pohyblivé části: a) zdroj magnetického pole permanentní magnety; b) zdroj magnetického pole elektrickým vinutím.



a)



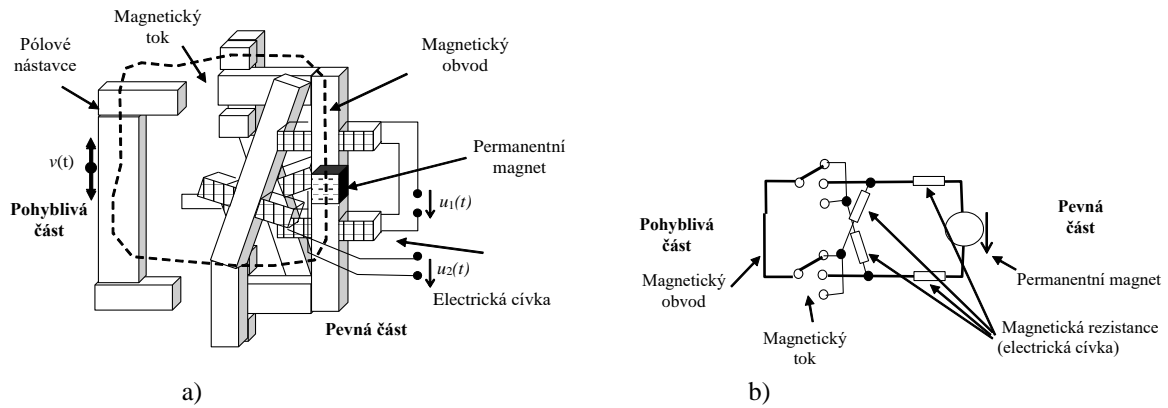
b)

**Obr. 24** Schéma uspořádání modifikovaného magnetického obvodu ve statorové části: a) zdroj magnetického pole buzeného permanentními magnety; b) buzené elektrickým vinutím

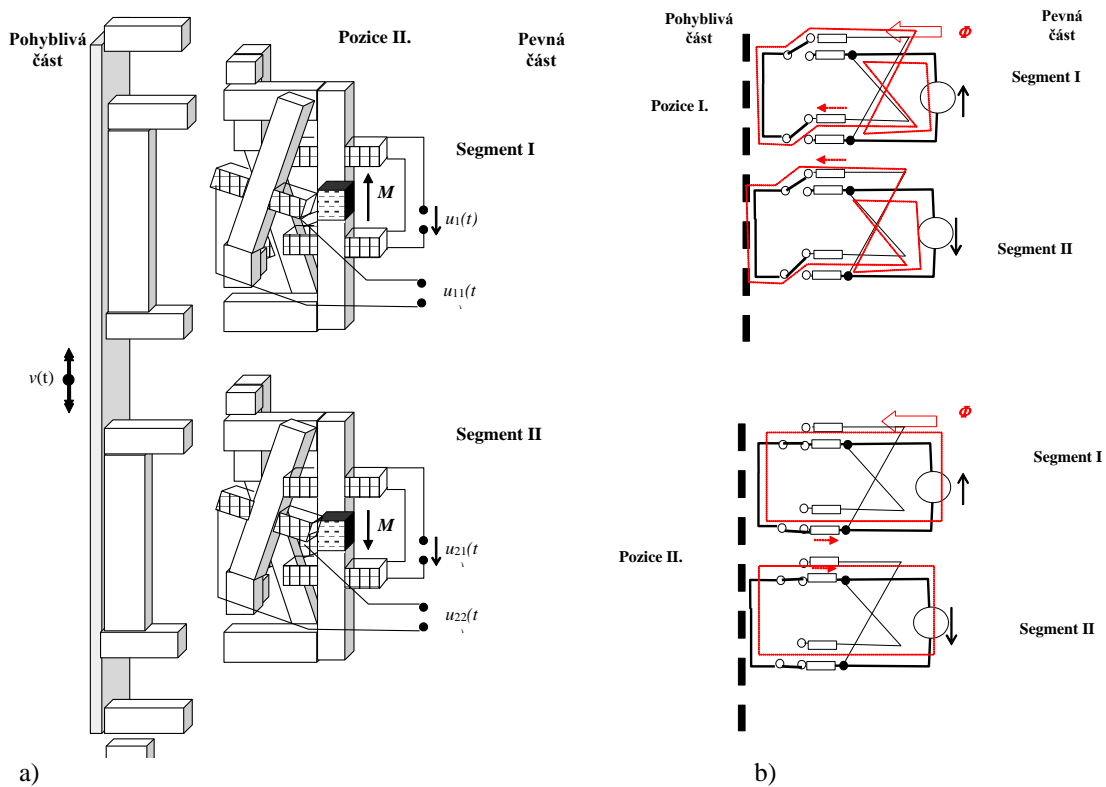
Pro dosažení vysoké efektivity přeměny pohybové energie pohyblivé části generátoru na elektrickou pomocí Faradayova indukčního zákona (3) je navržen koncept uspořádání magnetického obvodu a schématicky je zobrazen na obr. 25. V porovnání s koncepty z obrázků obr. 20 až obr. 24 je uspořádání magnetického obvodu z obr. 25a) je charakteristické pro malý zdvih a velmi vysokou změnu magnetického toku  $d\Phi/dx$  a ve svém důsledku pak  $d\Phi/dt$ . Na obr. 25b lze ze schématu magnetického obvodu vidět způsob efektivity vytěžení změn magnetického toku. Jak bylo experimenty ukázáno a publikováno [25–27], [31–32], [41] dosahuje se touto úpravou až 2500násobného zvýšení indukovaného napětí  $u(t)$  při srovnatelných podmínkách jinak koncipovaného řešení. Potom na navrženém uspořádání, obr. 25 je výsledné elektrické napětí

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) \quad , \quad (5)$$

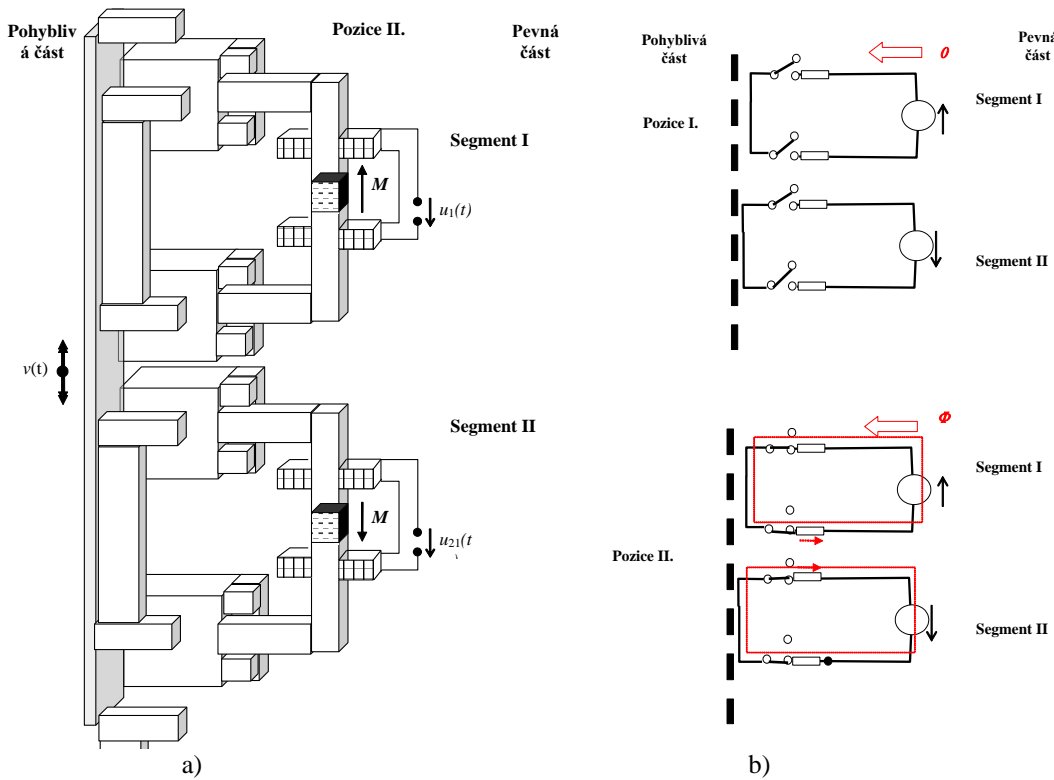
V technickém provedení se navržený segment magnetického uspořádání lineárního generátoru, obr. 25, bude periodicky opakovat. Návrhy uspořádání pro periodické nastavení jsou zobrazena na obr. 26 až obr. 28.



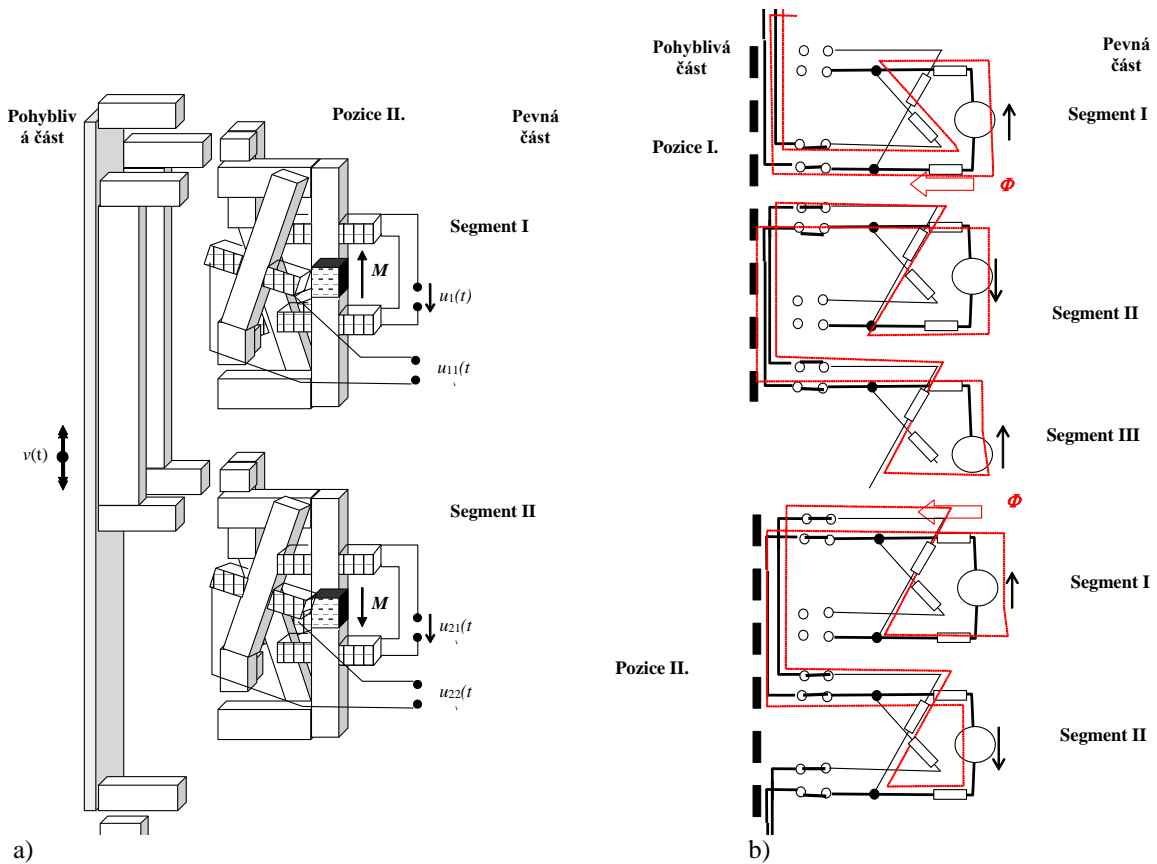
**Obr. 25** Schéma jádra generátoru uspořádání magnetického obvodu: a) principiální geometrické uspořádání; b) schéma modelu vyjádřeného pomocí soustředěných parametrů magnetického obvodu.



**Obr. 26** Schéma segmentu I a II jednoduchého uspořádání magnetického obvodu lineárního generátoru s aplikací změny magnetického toku pomocí pohyblivé a pevné části: a) principiální geometrické uspořádání; b) schéma magnetického obvodu se soustředěnými parametry.



**Obr. 27** Schéma segmentu I a II jednoduchého uspořádání magnetického obvodu lineárního generátoru s aplikací změny magnetického toku pomocí pohyblivé a pevné části s jednodušším uspořádáním statické části: a) principiální geometrické uspořádání; b) schéma magnetického obvodu se soustředěnými parametry.



**Obr. 28** Schéma segmentu I a II jednoduchého uspořádání magnetického obvodu lineárního generátoru s aplikací změny magnetického toku pomocí pohyblivé a pevné části s magneticky vázanými segmenty: a) principiální geometrické uspořádání; b) schéma magnetického obvodu se soustředěnými parametry.

## 5. Návrh teoretického modelu elektromagnetického mechanicky poháněného lineárního EM generátoru

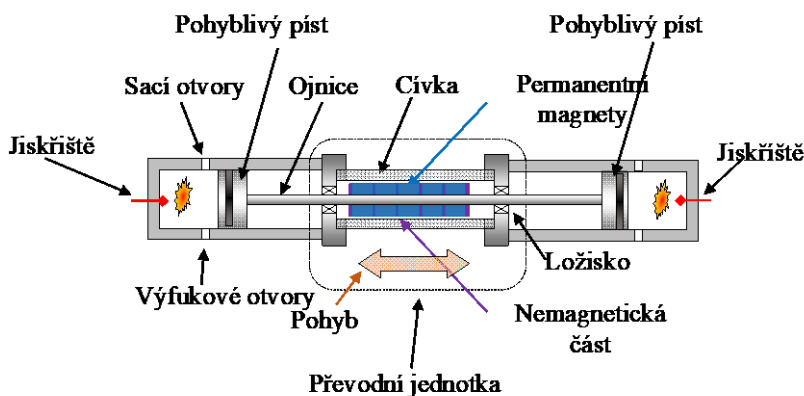
Dynamika a sružený model (elektromagnetický a dynamický pohyb) lze popsat základním modelem pomocí parciálních diferenciálních rovnic. Uvažuje-li se segment elektromagnetické uspořádání lineárního generátoru například podle obr. 25a, bude v dynamickém netlumeném stavu poháněn odpovídající jednotkou (například konvenční motor), lze pro sestavu motor-generátor formulovat obecný matematický model

$$m_c a + l_{ce} v + k_c x = F_{emg} + F_{mech} + F_{alt}, \quad (6)$$

kde  $k_c$  je koeficient celkové tuhosti systému,  $l_{ce}$  je koeficient celkového tlumení systému a  $m_c$  je hmotnost celku pohyblivé části systému, jak je na příkladu schématicky ukázáno na obr. 29. Model pohybu (6) lze upravit na tvar

$$m_c \ddot{x} + l_{ce} \dot{x} + k_c x = f_{mag}(B, \dot{x}, t) + f_{mech}(t) \quad (7)$$

kde  $x$  znamená polohu tělesa,  $\dot{x}$  vyjadřuje rychlost pohybující se části ( $dx/dt$ ),  $\ddot{x}$  je zrychlení pohybující se části ( $d^2x/dt^2$ ),  $f_{mag}$  znamená sílu působící na pohyblivou část prostřednictvím interakce s magnetickým polem a  $f_{mech}$  označuje sílu mechanického pohybu pohyblivé části lineárního pohonu.



**Obr. 29** Příklad možného uspořádání lineární konstrukce motor-generátoru .

Doplnění energetické bilance systému (4) o energii uloženou ve zdroji magnetického pole (permanentní magnet) se zapíše jako

$$W_m = \int_{V_m} \frac{1}{2} B_M H_M dV, \quad (8)$$

kde  $B_M$ ,  $H_M$  jsou hustota magnetického toku a magnetická intenzita v pracovním bodě permanentního magnetu a  $V_m$  označuje objem permanentního magnetu. Energie přeměněná na teplo (Joulovo teplo) ve vnitřní zatížené cívkě (pro naši úlohu a model nevratná forma energie) se zapíše

$$W_j = \int_{V_j} \frac{1}{2} \frac{J^2}{\gamma} dV, \quad (9)$$

kde  $\gamma$  je měrná vodivost vodiče cívk,  $\mathbf{J}$  představuje vektor aktuální hustoty a  $V_j$  představuje objem vodičů cívk. Energie, která tlumí pohyblivý oscilační pohyb jádra generátoru v důsledku elektrického zatížení na svorkách cívk, se formuluje jako

$$W_V = \int_{\ell} \int_{V_j} f_m dV \cdot \mathbf{n} d\ell = \int_{\ell} \int_{V_j} (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV \cdot \mathbf{n} d\ell, \quad (10)$$

kde  $f_m$  je měrná síla působící na pohybovou část generátoru,  $\mathbf{n}$  znamená normálový vektor ve směru toku elektrického proudu  $i(t)$ ,  $d\ell$  označuje délku posunutí v důsledku specifické síly,  $\mathbf{B}$  je vektor hustoty magnetického toku a  $V_j$  vyjadřuje objem elektricky vodivých složek. Z rovnic (6)–(10) získáme stavovou rovnici zapsanou jako

$$m_m a dx - \int_{\ell} \int_{V_j} (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) dV \cdot \mathbf{n} d\ell - \int_{V_{jc}} \frac{1}{2} \frac{J^2}{\gamma} dV = \frac{1}{2} m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2, \quad (11)$$

$$\eta \int_{V_m} \frac{1}{2} B_M H_M dV = \frac{1}{2} m_m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2, \quad (12)$$

kde  $dx$  je výchylka jádra generátoru,  $\eta$  představuje účinnost využití energie modulu s permanentními magnety,  $a$  označuje zrychlení ( $d^2x/dt^2$ ). Po úpravě a po vložení výrazů pro napětí a proud je z rovnic (11) a (12) upravený výraz

$$m_m a dx - \int_{\ell} \int_{V_j} \left( \frac{I}{S_v} \mathbf{n} \times \mathbf{B} \right) dV \cdot \mathbf{n} d\ell - \int_{V_{jc}} \frac{1}{2} \frac{\left( \frac{I}{S_v} \right)^2}{\gamma} dV = \frac{1}{2} m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (13)$$

kde  $I$  je maximální hodnota amplitudy elektrického proudu protékajícího vodičem cívky,  $S_v$  je průřez vodiče vinutí a  $dt$  je změna času. Pak máme dále upravený tvar

$$m_m a dx - \int_{\ell} \int_{V_j} \left( \frac{P}{U S_v} \mathbf{n} \times \mathbf{B} \right) dV \cdot \mathbf{n} d\ell - \int_{V_{jc}} \frac{1}{2} \frac{\left( \frac{P}{U S_v} \right)^2}{\gamma} dV = \frac{1}{2} m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 \quad (14)$$

Porovnáním rovnic (11)–(14) se získá výraz, ze kterého lze určit řádové rozměry pohyblivé části (jádra) generátoru v závislosti na předem zadaných elektrických parametrech výkonu  $P$ , napětí  $U$ , proudu  $I$ , a dalších.

$$m_m a dx - \int_{\ell} \int_{V_j} \left( \frac{P}{U S_v} \mathbf{n} \times \mathbf{B} \right) dV \cdot \mathbf{n} d\ell - \int_{V_{jc}} \frac{1}{2} \frac{\left( \frac{P}{U S_v} \right)^2}{\gamma} dV = \eta \int_{V_M} \frac{1}{2} B_M H_M dV \quad (15)$$

Podle rovnic (6)–(14) dává součet brzdících sil  $F_{br}$  základní vztah, který charakterizuje systém generátoru. Máme pak vztahy postupně úpravou ukazující vazby

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + l_c \frac{dx}{dt} + k x = m_m \frac{d^2 x}{dt^2} - \underbrace{\int_{V_j} (\mathbf{J}_v \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{n} dV}_{F_{br}} - \int_{V_{jc}} (\mathbf{J}_{circ} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{n} dV, \quad (16)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + l_c \frac{dx}{dt} + k x = m_m \frac{d^2 x}{dt^2} - \int_{V_j} \left( \left( \frac{dx}{dt} \mathbf{u}_x \times \mathbf{B}_{br}(t) \right) \times \mathbf{B} \right) \cdot \mathbf{n} dV - \int_{V_{jc}} \left( \frac{i(t)}{S_v} \mathbf{n} \times \mathbf{B} \right) \cdot \mathbf{n} dV, \quad (17)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + l_c \frac{dx}{dt} + k x = m_m \frac{d^2 x}{dt^2} - \int_{V_j} \left( \left( \frac{dx}{dt} \mathbf{u}_x \times \mathbf{B}_{br}(t) \right) \times \mathbf{B} \right) \cdot \mathbf{n} dV - \int_{\ell_{jc}} (i(t) \mathbf{n} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{n} d\ell, \quad (18)$$

kde  $\mathbf{B}_{br}$  je brzdící složka vektoru magnetické indukce,  $\mathbf{J}_v$  označuje vektor hustoty proudu elektricky vodivých součástí v důsledku vířivých proudů,  $\mathbf{J}_{circ}$  představuje vektor hustoty proudu ve vinutí cívky,  $i(t)$  znamená okamžitou hodnotu elektrického proudu cívky a  $\mathbf{u}_x$  je jednotkový vektor souřadnicového systému. Zajímavé je, že v této souvislosti lze přístupy popsané ve výzkumných článcích [26–231] považovat za inspirativní pro další charakterizaci postupu modelování.

Výše popsaný model byl sestaven pomocí metody konečných prvků (MKP) v systému ANSYS [224], publikace s podrobným popsáním modelu byla zveřejněna [27]. Byla analyzována jak dynamika modelu v modulu Ansys Multiphysics [224], tak dílčí problémy distribuce magnetického pole pro statické a kvazistacionární uspořádání, jak je uvedeno níže. Pro správné rozhodování a volby koncepcí následného užití, návrhů modelů pohonu harvestorů a volby kombinací energetických přeměn je nutné akceptovat použití „médii a zdrojů“ s dosažitelnou objemovou hustotou efektivního výkonu  $p_{efd}$  [ $W/m^3$ ], jak ukazuje tabulka Tab.3. Jednoduchý odhad energie uložené ve stlačeném vzduchu, jak je znám např. z [225], s jeho následujícím využitím je formulován ve vztahu (19) jako

$$W_{1m3} = p_B V_B \ln \left( \frac{p_A}{p_B} \right) + V_B (p_B - p_A) \quad (19)$$

kde  $W_{1m3}$  je energie stlačeného média (vzduchu) o objemu  $V_B$ ,  $p_B$  je počáteční hodnota tlaku média,  $p_A$  je konečná hodnota tlaku média. Pak příklad pro  $V_B = 1m^3$  stlačený na tlak  $p_B = 7$  MPa ze vztahu (19), energie  $W_{1m3} = 7.0 \cdot 1 \cdot \ln(0.1 / 7.0) + 1 \cdot (7.0 - 0.1) = -22.8$  MJ/ $m^3$ . Pro usnadnění a zjednodušení je možné vyjádřit z objemové hustoty energie  $w$  [ $Ws/m^3$ ] pro jednotku času  $t = 1$  s výkonovou hustotu  $p_{efd}$ , jak je uvedeno v tabulce 1.

**Tab. 3** Základní parametry některých vybraných „zdrojů“ pro „přeměnu/výrobu elektřiny“ odvozené z inženýrských návrhů.

Typ zdroje, reference	* Effective Power Volume Density $p_{\text{efd}} [\text{W}/\text{m}^3]$	** Effective Mass Volume Density $\rho_{\text{ef}} [\text{kg}/\text{m}^3]$
Lith. baterie [226]	$\approx 4 \cdot 10^7$	$\approx 530$
Peltierův článek [227]	$\approx 2.2 \cdot 10^6 @ \Delta T = 72 \text{ K}$	$\approx 5800$
Superkapacitor [228]	$\approx 3-5$	$\approx 880$
Fotovoltaický článek [225]	$\approx 200 [\text{W}/\text{m}^2] \approx (4 \cdot 10^4 [\text{W}/\text{m}^3])$	$\approx 2320$
Stlačený vzduch [25]	$\approx 2.28 \cdot 10^7 @ p_{\text{A-B}} = 7 \text{ MPa}$	$\approx 1.3 (50)$
Benzín (organické palivo) [25]	$\approx 4 \cdot 10^9$	$\approx 750$
$U_{235}$ [25]	$\approx 9 \cdot 10^{16}$	$\approx 19 \cdot 10^3$

\*. Výkon dosažitelný se známým objemem technického provedení. \*\*. Objemová hmotnost související se známým technickým řešením a provedením.

Aby formulovaný model převodu pohybové energie (6)-(18) byl dále využitelný, je potřeba vyjádřit jeho formulaci a analýzu pomocí dostupných prostředků řešení parciálních diferenciálních rovnic. Tím je například metoda konečných prvků. Dále bude odvozen model pomocí metody konečných prvků pro uvedené soustrojí pohybový element – generátor, tedy v diskutovaném pojetí robustní harvestor.

## 6. Numerický model

Jak je uvedeno v principech a základech analytického návrhu modelu (1) až (19) obr. 15 až obr. 28, je možné elektromagnetické pole popsat obecněji pomocí numerického modelu MKP [17], [25–28], [31–32], [41], [224]. Elektromechanický vibrační harvestor (15-18) pracuje ve dynamickém režimu; jeho model zahrnuje nelinearity a materiálové nelinearity v závislosti na teplotě, stochastického způsobu elektrické zátěže atd. Jako důležitá část harvestoru byla modelována a simulována 3D struktura magnetických nástavců v oblasti změny magnetického toku, obr. 24 až obr. 28, průběžně publikována [17], [25–28], [31–32], [41].

Návrh numerického modelu je založen na redukované sadě Maxwellových rovnic [222] v Heavisideově notaci pro kvazistacionární nebo nestacionární případy sdruženého modelu elektromagnetického pole. V modelu byly použity prvky s vysokou mírou nelinearity a hystereze (permanentní magnet, feromagnetický materiál pólových nástavců atd.).

Model formulovaný pomocí parciálních diferenciálních rovnic pak lze popsat pomocí následujících rovnic

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (20)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (21)$$

kde  $\mathbf{H}$  je vektor magnetické intenzity,  $\mathbf{B}$  je vektor hustoty magnetického toku,  $\mathbf{J}$  je vektor proudové hustoty.

$$\text{rot } \mathbf{E} = \mathbf{0}, \quad (22)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (23)$$

$$\text{div } \mathbf{J} = 0, \quad (24)$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho_e, \quad (25)$$

kde  $\mathbf{E}$  je vektor intenzity elektrického pole,  $\mathbf{D}$  je vektor hustoty elektrického toku,  $\rho_e$  je hustota elektrického náboje, který je nulový pro základní konstrukci v modelu generátoru oblastí  $\Omega_s, \Omega_v, \rho_{e\Omega_s\Omega_v}$ . Materiálové vztahy jsou reprezentovány rovnicemi, které respektují použití permanentních magnetů s magnetizací  $\mathbf{M}$  v obou funkčních částech, hlavní části generátoru a jejich tlumicích prvcích, pro jednoduchost materiály jako izotropní, homogenní.

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}, \quad (26)$$

$$\mathbf{J}_v = \mathbf{E} \gamma, \quad (27)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (28)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $\mu_r$  je relativní permeabilita,  $\mu = \mu_r \mu_0$ ,  $\mathbf{M}$  je vektor magnetizace pro oblast  $\Omega_{pm}$  permanentního magnetu,  $\gamma$  je měrná elektrická vodivost,  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua,  $\varepsilon_r$  je relativní permitivita,  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ . Časové změny elektrického a magnetického pole v uvažovaném modelu jsou podle očekávaných parametrů nezanedbatelné (16-19). Vektorové funkce elektrických a magnetických polí jsou vyjádřeny pomocí skalární elektriky  $\varphi_e$  a vektor magnetického potenciálu  $\mathbf{A}$

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi_e - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}, \quad (29)$$

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}, \quad (30)$$

Celková proudová hustota z rovnice (20)  $\mathbf{J}$  je superponována z hustoty budícího proudu vnějšího elektrického obvodu  $\mathbf{J}_{circ}$  a proudové hustoty vířivých proudů  $\mathbf{J}_v$ . Pohyb je v modelu respektován proudovou hustotou  $\mathbf{J}_m$  v obou částech, elektricky vodivých oblastech a elektrických vinutích podle

$$\mathbf{J}_m = \gamma(\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (31)$$

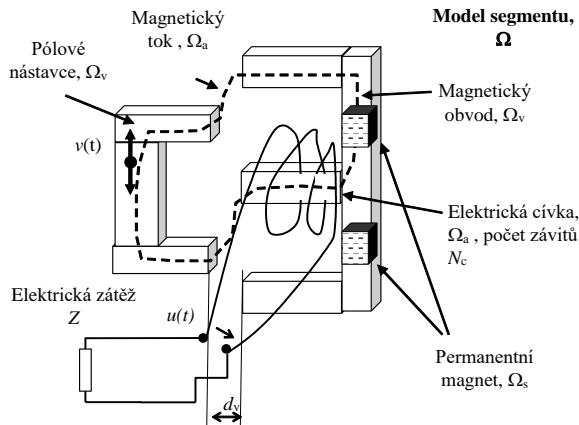
$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_v + \mathbf{J}_{circ} + \mathbf{J}_m \quad (32)$$

Model elektromagnetického pole je formulován z rovnic (20) až (32). Potom je vztah (20) upraven  $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}_v + \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_m$  v celém modelu  $\Omega$ .

Pro jednotlivé díly, obr. 30, modelu platí  $\Omega \subset \Omega_v \cup \Omega_s \cup \Omega_a$ , kde  $\Omega_v$  je oblast s dominantními vířivými proudy, podle rovnice (23), (27), (31),  $\Omega_s$  je oblast se známým rozložením proudové hustoty  $\mathbf{J}_s$ ,  $\Omega_a$  je oblast bez vířivých proudů a bez rozložení proudové hustoty  $\mathbf{J}_s$ . V uvažovaném modelu, obr. 30:

$$\Omega_s \notin \Omega_v \quad (34)$$

Potom lze rovnici (33) upravit pomocí výrazů (20) až (32) s ohledem na zdroj magnetického pole nebo tlumivé prvky na bázi permanentních magnetů, které jsou reprezentovány vektorem magnetizace  $\mathbf{M}$ , obr. 30:



Obr. 30 Základní oblasti  $\Omega$  numerického modelu lineární konstrukce generátoru.

$$\text{rot } \frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} - \gamma \left( -\text{grad } \varphi_e - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) - \gamma \left( \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial t} \times \text{rot } \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_s + \text{rot } (\mathbf{M}) \quad \text{v oblasti } \Omega_v, \quad (35)$$

$$\text{rot } \frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} - \gamma \left( \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial t} \times \text{rot } \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_s + \text{rot } (\mathbf{M}) \quad \text{v oblasti } \bar{\Omega}_v, \quad (36)$$

kde  $\mathbf{v}$  je vektor rychlosti pohybu oblasti  $\Omega$ ,  $\mathbf{s}$  je vektor posunutí, a potom

$$\text{div } \gamma \left( -\text{grad } \varphi_e - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad \text{pro oblast } \Omega. \quad (37)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{pro oblast } \Omega \quad (38)$$

Z rovnic (20) a (23), kde je postihnuta vazba mezi elektrickým a magnetickým polem je vyjádřena pomocí potenciálů jako

$$\operatorname{rot} \left( -\operatorname{grad} \varphi_e - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = -\operatorname{rot} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad \text{pro oblast } \Omega. \quad (39)$$

Z rovnice (39), která postihuje rozložení elektrického pole je potom

$$\operatorname{div} \varepsilon \left( -\operatorname{grad} \varphi_e - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = \rho_e \quad \text{pro oblast } \bar{\Omega}_v. \quad (40)$$

Hraniční a počáteční podmínky lze formulovat jako:

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot (\gamma_i \operatorname{grad} \varphi_{e,i}) &= 0 \quad \text{na hranici } \Gamma_\Omega, \text{ kde } i, j \text{ značí indexy rozhraní oblastí,} \\ \mathbf{n} \cdot (\gamma_i \operatorname{grad} \varphi_{e,i} - \gamma_j \operatorname{grad} \varphi_{e,j}) &= 0 \quad \text{na hranici } \Gamma_{ij}, i \neq j, \\ \mathbf{n} \cdot (\varepsilon_i \operatorname{grad} \varphi_{e,i}) &= K_0 \quad \text{na hranici } \Gamma_\Omega, \\ \mathbf{n} \cdot (\varepsilon_i \operatorname{grad} \varphi_{e,i} - \varepsilon_j \operatorname{grad} \varphi_{e,j}) &= K_1 \quad \text{na hranici } \Gamma_{ij}, i \neq j, \\ \mathbf{n} \cdot \left( \gamma_i \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial t} \right) &= 0 \quad \text{na hranici } \Gamma_\Omega, \\ \mathbf{n} \cdot \left( \gamma_i \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial t} - \gamma_j \frac{\partial \mathbf{A}_j}{\partial t} \right) &= 0 \quad \text{na hranici } \Gamma_{ij}, i \neq j, \quad \mathbf{n} \cdot \left( \varepsilon_i \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial t} \right) = K_2 \quad \text{na hranici } \Gamma_\Omega, \\ \mathbf{n} \cdot \left( \varepsilon_i \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial t} - \varepsilon_j \frac{\partial \mathbf{A}_j}{\partial t} \right) &= K_3 \quad \text{na hranici } \Gamma_{ij}, i \neq j, \\ \mathbf{n} \times (\operatorname{grad} \varphi_{e,i} - \operatorname{grad} \varphi_{e,j}) &= \mathbf{0} \quad \text{na hranici } \Gamma_{ij}, i \neq j. \\ \mathbf{n} \times (\operatorname{grad} \varphi_{e,i}) &= \mathbf{0} \quad \text{na hranici } \Gamma_\Omega. \quad \mathbf{n} \cdot (\operatorname{rot} \mathbf{A}_i - \operatorname{rot} \mathbf{A}_j) = 0 \quad \text{na hranici } \Gamma_{ij}, i \neq j, \\ \mathbf{n} \cdot (\operatorname{rot} \mathbf{A}_i) &= 0 \quad \text{na hranici } \Gamma_\Omega, \\ \mathbf{n} \cdot \left( \gamma_i \frac{\partial \mathbf{s}_i}{\partial t} \times \gamma_i \operatorname{rot} \mathbf{A}_i - \gamma_j \frac{\partial \mathbf{s}_j}{\partial t} \times \gamma_j \operatorname{rot} \mathbf{A}_j \right) &= 0 \quad \text{na hranici } \Gamma_{ij}, i \neq j, \\ \mathbf{n} \cdot \left( \gamma_i \frac{d \mathbf{s}_i}{dt} \times \gamma_i \operatorname{rot} \mathbf{A}_i \right) &= 0 \quad \text{na hranici } \Gamma_\Omega. \end{aligned} \quad (41)$$

kde  $\mathbf{n}$  je normálová jednotkový vektor kolmý na hranici rozhraní oblasti  $\Gamma$ ,  $\Gamma_{ij}$  je hranice mezi oblastmi s indexy  $i$  a  $j$ ,  $\Gamma_\Omega$  je rozhraní vnější hranice oblasti  $\Omega$ ; indexy  $i, j$  označují přiřazení veličin oblastem  $\Omega_i \neq \Omega_j$ . Počáteční podmínky jsou

$$\begin{aligned} \varphi_e(x, y, z, t_0) &= \varphi_e(x, y, z) \quad t_0 = 0, \quad (x, y, z) \in \Omega \quad \mathbf{A}(x, y, z, t_0) = \mathbf{A}(x, y, z) \quad t_0 = 0, \quad (x, y, z) \in \Omega \\ \mathbf{r}(x, y, z, t_0) &= \mathbf{r}(x, y, z) \quad t_0 = 0, \quad (x, y, z) \in \Omega \quad \frac{d \mathbf{s}(x, y, z, t_0)}{dt} = \frac{d \mathbf{s}(x, y, z)}{dt} \quad t_0 = 0, \quad (x, y, z) \in \Omega \\ \frac{d \mathbf{A}(x, y, z, t_0)}{dt} &= \frac{d \mathbf{A}(x, y, z)}{dt} \quad t_0 = 0, \quad (x, y, z) \in \Omega \end{aligned} \quad (42)$$

Takto navržený numerický model pomocí parciálních diferenciálních rovnic lze převést známými metodami diskretizace a následné minimalizace Galerkinovou metodou na metodu konečných prvků (MKP). Diskretizace potenciálů, posunutí a dalších veličin je ze vztahů (35) až (40) zapsán jako

$$\varphi_e = \sum_{k=1}^{N_\varphi} \phi_{ek} W_k(x, y, z), \quad \forall (x, y, z) \in \Omega, \quad (43)$$

kde  $\phi_e$  je uzlová hodnota skalárního elektrického potenciálu,  $W$  je básová funkce,  $N_\phi$  je počet uzlů elementu diskretizované sítě,

$$s = \sum_{k=1}^{N_s} S_k W_k(x, y, z) \quad \forall (x, y, z) \in \Omega \quad (44)$$

kde  $S$  je souřadnice polohy uzlu,  $W$  je básová funkce,  $N_s$  je počet uzlů elementu diskretizované sítě,

$$A = \sum_{k=1}^{N_A} a_k W_k(x, y, z) \quad \forall (x, y, z) \in \Omega \quad (45)$$

kde  $a$  je uzlová hodnota vektorového magnetického potenciálu,  $W$  je básová funkce,  $N_A$  je počet uzlů elementu diskretizované sítě. Aplikací aproximací (43) až (45) a Galerkinovy metody pro model (35), (36) dostaneme semidiskrétní řešení pro oblast  $\Omega$  modelu metody MKP

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} A - \gamma \left( -\text{grad} \phi_e - \frac{\partial A}{\partial t} \right) - \gamma \left( \frac{\partial s}{\partial t} \times \text{rot} A \right) = J_s + \text{rot}(M) \quad (46)$$

$$\int_{\Omega_m} W_i \cdot \left( \text{rot} \frac{1}{\mu} \cdot \text{rot} A - \frac{1}{\mu} \cdot \text{grad} \text{div} A - \gamma \left( -\frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad} \phi_e \right) - \gamma \left( \frac{\partial s}{\partial t} \times \text{rot} A \right) - J_s - \text{rot}(M) \right) d\Omega = 0 \quad (47)$$

$$i = 1, \dots, N_{i\Omega}$$

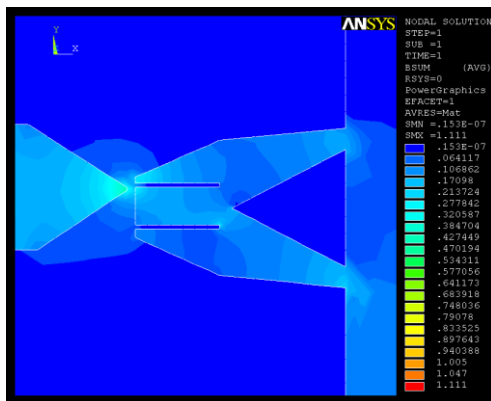
Rovnice (47) je upravena pomocí druhé Greenovy a Gaussovy věty

$$\int_{\Omega_m} \frac{1}{\mu} \text{rot} A \cdot \text{rot} W_i \cdot d\Omega + \oint_{\Gamma_m} \frac{1}{\mu} (\mathbf{n} \times \text{rot} A) \cdot W_i \cdot d\Gamma + \int_{\Omega_m} \frac{1}{\mu} \text{div} A \cdot \text{grad} W_i \cdot d\Omega - \oint_{\Gamma_m} \left[ \frac{1}{\mu} \text{div} A \cdot W \right] \cdot \mathbf{n} \cdot d\Gamma \quad (48)$$

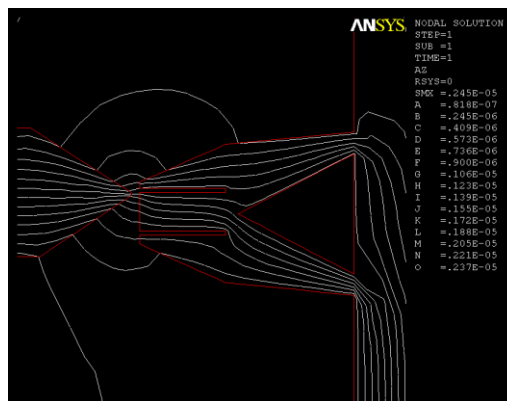
$$+ \int_{\Omega_m} W_i \cdot \gamma \frac{\partial A}{\partial t} \cdot d\Omega + \int_{\Omega_m} W_i \cdot \gamma \text{grad} \phi_e \cdot d\Omega - \int_{\Omega_m} W_i \cdot \gamma \left( \frac{\partial s}{\partial t} \times \text{rot} A \right) \cdot d\Omega = \int_{\Omega_m} W_i \cdot J_s \cdot d\Omega + \int_{\Omega_m} W_i \cdot \text{rot}(M) \cdot d\Omega$$

Jednoduchou úpravou z modelu (48) lze pak pro oblast modelu získat soustavy rovnic a je tak převeden fyzikální model na matematický. Ten lze již řešit pomocí standardních nástrojů. Pro uvažovaný model byl využit preprocessor a postprocessor systém ANSYS Multiphysics [224].

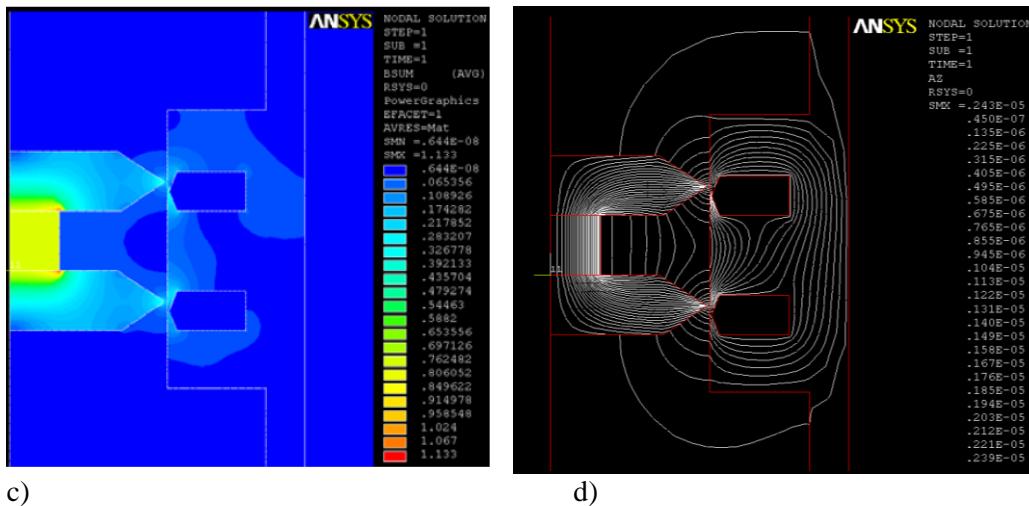
Jako klíčovou oblast generátoru (obr. 31), bylo nutné modelovat a řešit oblast přepínání magnetického toku mezi pohyblivou a pevnou částí generátoru (obr. 31, 32). A to tak, aby byla dosažena maximální změna toku podle zákona z rovnice (3). Podrobně byly výsledky publikovány v práci [25], [32]. Na obr. 31 je zobrazeno rozložení měrného magnetického toku  $B$  pro vyhodnocení modelu příkladu jednočinného a dvojjinného uspořádání přechodu magnetického toku. Tomu odpovídá konfigurace obr. 22a a obr. 22b.



a)

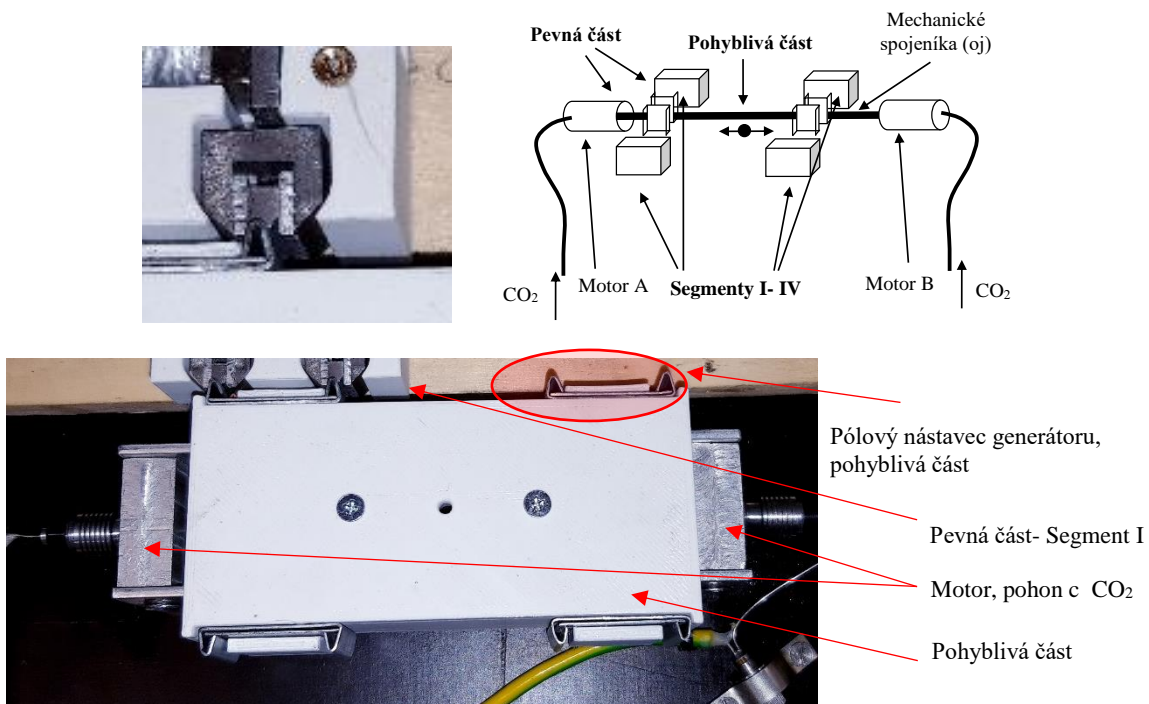


b)



**Obr. 31** Příklad modelovaného řešení přechodu toku pólových nástavců MKP řešení geometrie s uchycením pólů, jednočinné nebo dvočinné modely: a) modul měrného magnetického toku  $B$ ; b) siločáry měrného magnetického toku v detailním návrhu jednočinného převodníku magnetického toku; c) modul měrného magnetického toku  $B$  dvočinného uspořádání; d) siločáry měrného magnetického toku v detailním návrhu dvočinného převodníku magnetického toku.

Experimentálně realizované a ověřené uspořádání je zobrazeno na obr. 32. Výsledky porovnání obou modelů, jak jednočinného tak dvoučinného provedení uspořádání magnetického obvodu generátoru jsou publikovány v práci [25], [32]. Změnou konfigurace magnetického obvodu z jednočinného, obr. 24a na dvoučinný systém, podle obr. 19c a obr. 25a bylo dosaženo 2500 násobného zvýšení výsledného napětí  $u(t)$ , naměřeného na zatíženém vinutí generátoru impedancí  $Z$  při zachování počátečních, okrajových a elektrických parametrů konfigurace obou konstrukcí generátoru (zátěžová impedance  $Z$ , rychlost pohybu pohyblivé části  $v$ , počet segmentů  $n_s$ , nastavení vzdáleností vzduchových mezer  $d_v$ , počet závitů vinutí cívky  $N_c$  a dalších).



**Obr. 32** Experimentální část (jeden segment) ověřování jednočinné a dvoučinné varianty generátoru.

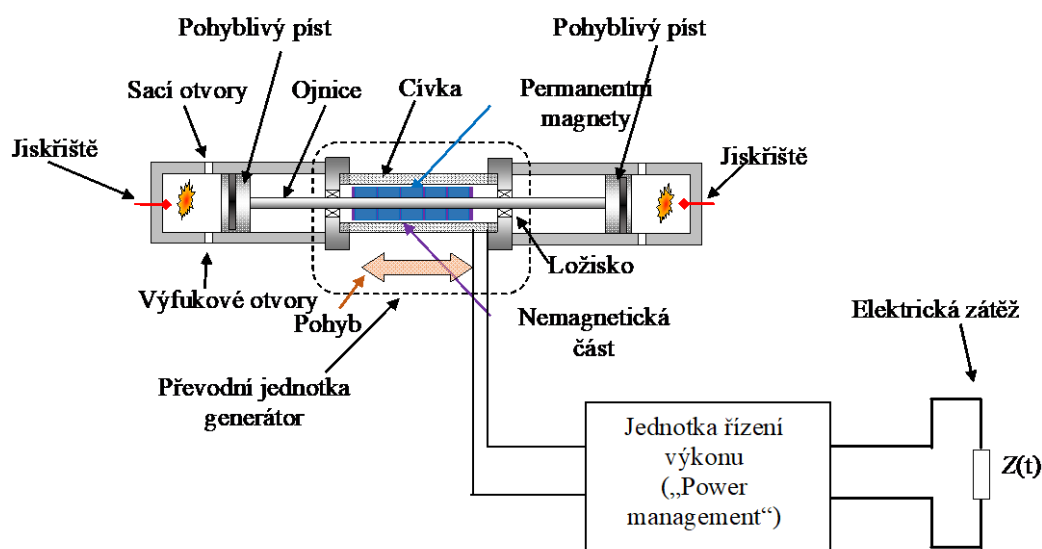
Dosud byla pro návrh lineárního generátoru nebo robustního harvestoru s pohonem lineárního motoru používána uspořádání, která vycházela z koncepce lineárního elektrického motoru [50–82], [108–127]. Nebyly brány v potaz jak zákonitosti dosažení maximální transformace pohybové energie na elektromagnetickou odvozenou z Faradayova indukčního zákona, obr. 16, relace (3). Návrh nového způsobu transformace spočíval v detailním a precizním nastavení magnetického obvodu s maximálním efektem rychlé změny magnetického toku v čase, obr. 17b. Byla zahrnuta problematika efektivního návrhu vinutí cívky generátoru, obr. 19c nebo efektivita při jednočinném nebo dvoučinném uspořádání magnetického obvodu generátoru, obr. 20g a obr. 20h.

Tyto nové poznatky byly řádně publikovány [17], [26–28], [31–32], [41].

## 7. Blokové uspořádání generátoru

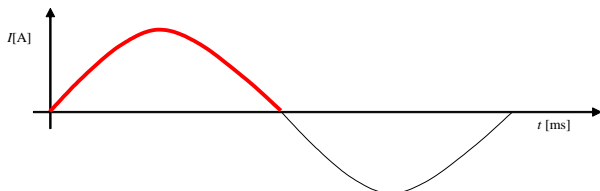
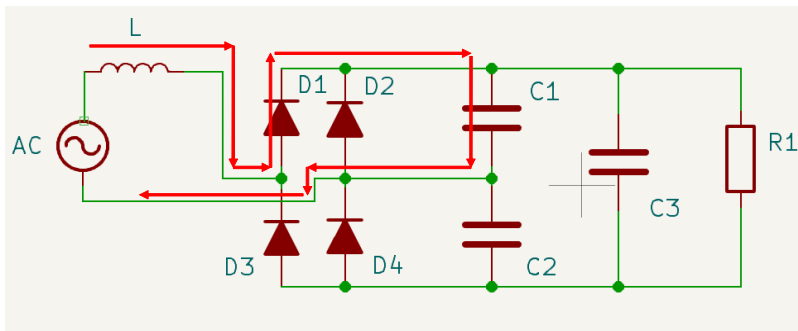
Z dosud známých a publikovaných poznatků [21–23], [31–33], [228] je pro harvestory v oblasti výtěžnosti jednotek až stovek mW, pracujících na principu přeměny energie pomocí Faradayova indukčního zákona a v rezonačním režimu, nutné udržovat v požadovaném režimu, je nutné zařadit za harvestor elektronický obvod, obr. 33. Ten hlídá elektrické zatížení harvestoru a také udržuje požadovaný režim zařízení a parametry výstupu, také upravuje fázové poměry vztahu okamžitých hodnot elektrického napětí  $u(t)$  a okamžitého elektrického proudu  $i(t)$  na elektrické zátěži  $Z(t)$ . Je zřejmé, že generátory/harvestory nemusí generovat periodický nebo harmonický průběh napětí na výstupu, proto je nutné se také zabývat touto otázkou.

Základním prvkem řídicího bloku z obr. 33 je obvod korekce výkonu a jeho účinnosti (tzv. power factor correction – PFC). Tento systém je známý a je například soustředěn jeho popis a použití variant zapojení v práci [237].

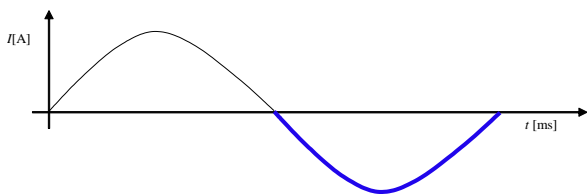
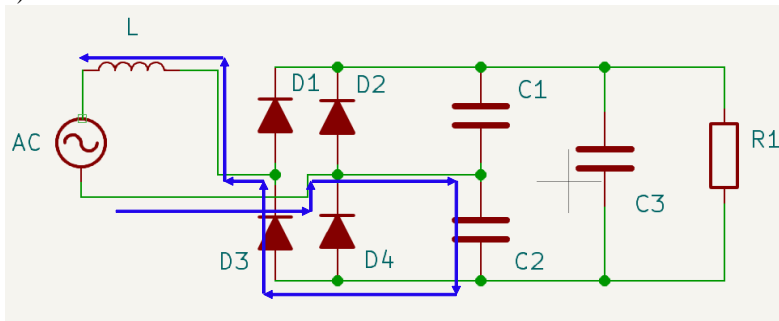


**Obr. 33** Principiální uspořádání robustního harvestoru složeného z lineárního spalovacího motoru v kombinaci s elektrickým generátorem, řízením výkonu a výstupem na elektrickou zátěž.

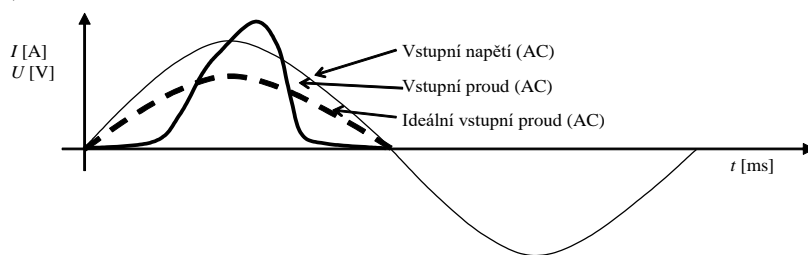
Základním zapojením PFC obvodu je tzv. pasivní provedení. Je zobrazeno na obr. 34. Zde je ukázka příkladu principiálního pasivního obvodu PFC s usměrňovačem se zdvojovačem napětí. Na obr. 34c je ukázán příklad očekávaného průběhu vstupního proudu a napětí pro tento obvod. Induktor  $L$  pomáhá zlepšit účinnost a diody a vyhlazovací kondenzátory převádějí střídavé napětí na stejnosměrné. Protože pasivní obvod PFC pracuje na frekvenci  $f_p$ , je pro frekvence průmyslového rozvodu ( $f = 50$  nebo  $60$  Hz) nutná hodnotově velká indukčnost  $L$ , která je realizovaná pomocí rozměrného provedení. Proto se pasivní PFC používá spíše pro nízkokapacitní napájecí zdroje.



a)



b)

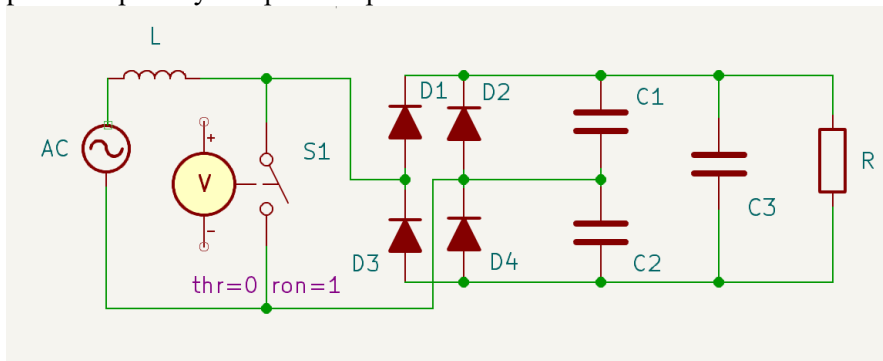


c)

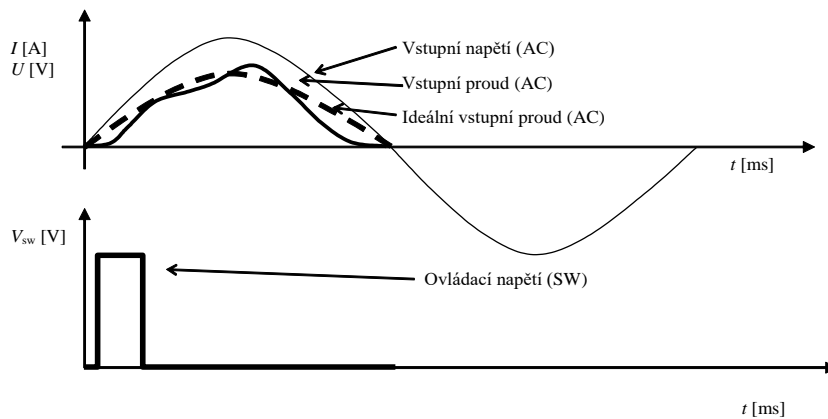
**Obr. 34** Principiální schéma uspořádání pasivního PFC obvodu pro nízké frekvence ( $f = 50\text{--}60\text{ Hz}$ ): a) nabíjení kladné vlny zdvojovače; b) nabíjení záporné vlny zdvojovače pro c) očekávané napětí a proudy.

Výše uvedenou nevýhodu lze částečně snížit tím, že se navrhne částečně spínaný PFC obvod, obr. 35. Tento obvod se skládá ze spínacího zařízení, V-S1, a provádí spínací operace několikrát za půl cyklu periodického nebo harmonického průběhu vstupního napětí. Tento PFC částečně zapíná spínací prvek a propouští proud do indukčnosti  $L$ , a to v intervalu, ve kterém u pasivního PFC neteče žádný proud. Částečně spínaný PFC prodlužuje dobu, po kterou teče vstupní proud do obvodu a zlepšuje tak účinnost. Protože v reaktoru lze ukládat energii, obvod PFC s částečným spínáním může zvýšit výstupní napětí na úroveň vyšší, než je napájecí napětí. Kromě toho může být obvod PFC s částečným spínáním navržen

tak, aby vykazoval velmi nízké spínací ztráty, protože provádí oddělení spínání pouze několikrát za polovinu periody vstupního napětí.



a)



b)

**Obr. 35** Principiální schéma uspořádání částečně spínaného PFC obvodu: a) schéma zapojení obvodu; b) očekávané napětí a proudy.

Další možností principiálního zapojení PFC obvodu je takzvané aktivní zapojení. Schéma takového obvodu je zachyceno na obr. 36. Protože konvertor zobrazený na obr. 36a se běžně používá pro aktivní PFC, obrázek obr.36 potom po krocích přibližuje funkci tohoto typu zapojení. Aktivní obvody PFC jsou rozděleny do tří typů podle použitého aktuálního režimu vedení:

- režim kontinuálního vedení ( CCM ),
- režim kritického vedení ( CRM ),
- režim přerušovaného vedení ( DCM ).

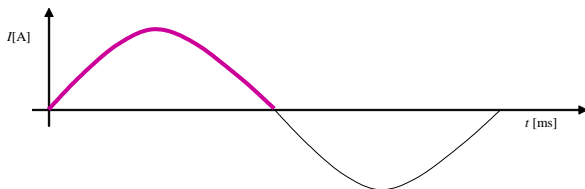
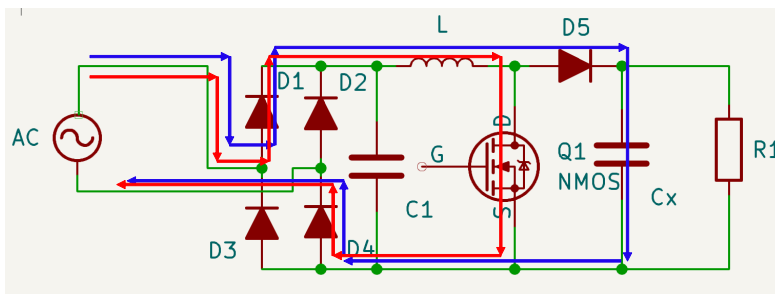
Aktivní obvod PFC řídí proud zapínáním a vypínáním MOSFETu Q1, synchronizuje napájecí napětí a fázi a přibližuje průběh vstupního proudu blíže harmonickému průběhu (funkce  $\sin()$ ). Na obr. 36a, 36b je aktuální cesta pro sepnutý Q1 označena šipkou a červenou barvou, zatímco cesta pro vypnutý Q1 je zvýrazněna modrou šipkou. Obr. 36c jsou zachyceny časové průběhy veličin napětí a proudů pro typické případy spínacího prvku MOSFET Q1 a výstupní diody D5 obvodu CCM PFC. Proud protékající Q1 a propustný proud výstupní diodou D5 se kombinují a poskytují vstupní proud pro induktor L. Potom lze zjednodušeně režimy vedení proudu CCM-CRM-DCM charakterizovat takto.

V režimu CCM obvodem PFC nepřetržitě prochází proud přes induktor L. Prvek Q1 zapne obvody PFC dříve, než elektrický proud  $i_L(t)$  induktancí L klesne na nulu. V režimu CCM PFC pracuje s pevnou frekvencí pro generování sinusového vstupního proudu. V porovnání s režimy CRM a DCM PFC může být režim CCM PFC navržen tak, aby omezil zvlnění proudu tekoucího do spínacího prvku Q1. Nevýhodou režimu CCM PFC je však to, že elektrický proud protéká výstupní diodou D5. Když se Q1 přeploží do sepnutého stavu, reverzní zotavovací proud diody D5 se kombinuje se zátěžovým proudem indukčnosti L, čímž se zvyšuje výkonová ztráta. Pro snížení spínacích ztrát, a tím zvýšení účinnosti, je nutné použít vysokorychlostní diodu D5 s krátkou dobou zpětného zotavení. K tomuto účelu se široce

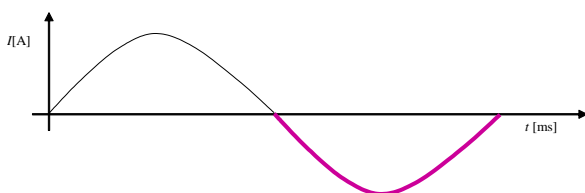
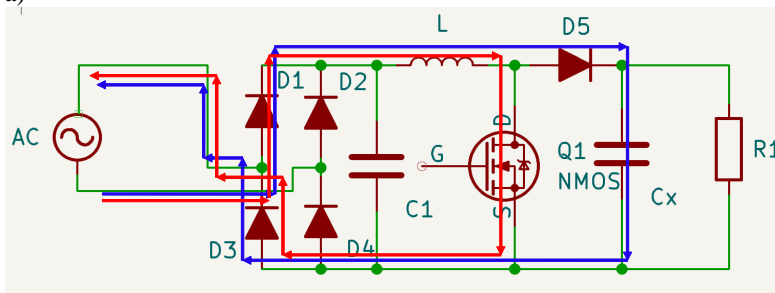
používá SiC Schottkyho bariérová dioda (SBD) a to pro napájecí zdroje s požadavkem vysoké účinnosti přenosu výkonu do zátěže R1. Na obr. 37 je zachycen průběh principiálního PFC v režimu CCM.

Pro režim CRM se prvek Q1 sepne, když proud indukčnosti L klesne na nulu. Předpokládejme, že okamžitá hodnota vstupního napětí během provozu je  $u_{AC}(t)$ . Špičkový proud  $I_p = U_{AC} \cdot t/L$ . Protože vstupní napětí  $u_{in}(t) = \sqrt{2} \cdot U_{AC} \cdot \sin\omega t$ , mění se  $i_p$  sinusově s  $u_{in}(t)$ . Potom průměrný vstupní proud  $I_{ave} = I_p/2$ , mění se i průměrná hodnota proudu  $i_{ave}(t)$  sinusově s  $u_{in}(t)$ . Obvod CRM PFC snímá výstupní napětí a podle toho řídí šířku impulsu spínače Q1. Obvod CRM PFC snižuje šířku impulsu Q1, když je výstupní napětí  $u_{R1}(t)$  příliš vysoké, a zvyšuje šířku impulsu, když je příliš nízké. Pracovní frekvence není pevná, protože se mění v závislosti na hodnotách výstupního a vstupního napětí. Se zvyšujícím se zatížením se snižuje pracovní frekvence. Na obr. 38 je zachycen průběh principiálního PFC v režimu CRM.

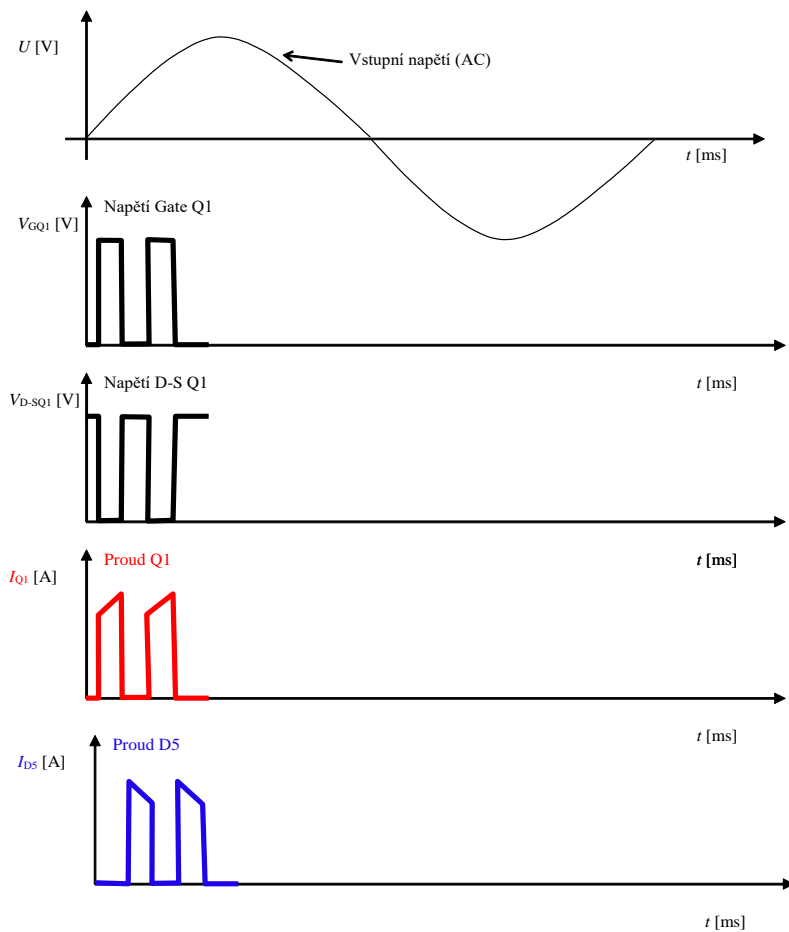
Režim DCM PFC má v periodickém průběhu proudu nulové hodnoty proudu, obr. 39. V tomto režimu je obvod a jeho řídicí část PFC velmi jednoduchá, protože jak frekvence, tak šířka stavu zapnutí prvku Q1 jsou konstantní. Obvod DCM PFC vykazuje vyšší špičkový proud než obvody CCM a CRM, a proto má vzhledem k CCM a CRM nižší účinnost přenosu výkonu. Není zde ale vliv na charakteristiky zpětného zotavení diody D5, protože prvek Q1 se zapne, když výstupní diodou D5 neprotéká žádný proud. To má za následek nízký šum.



a)

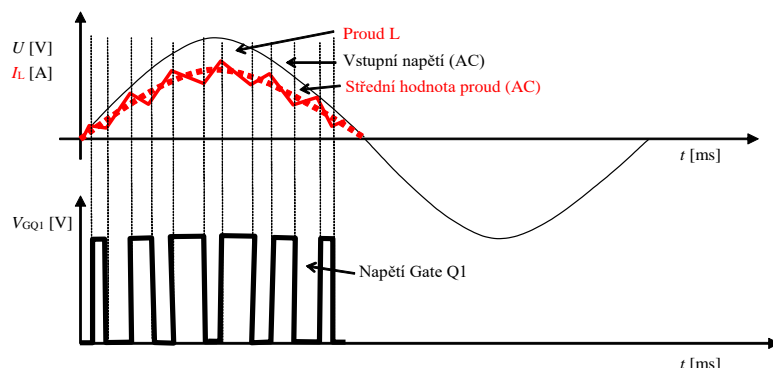


b)

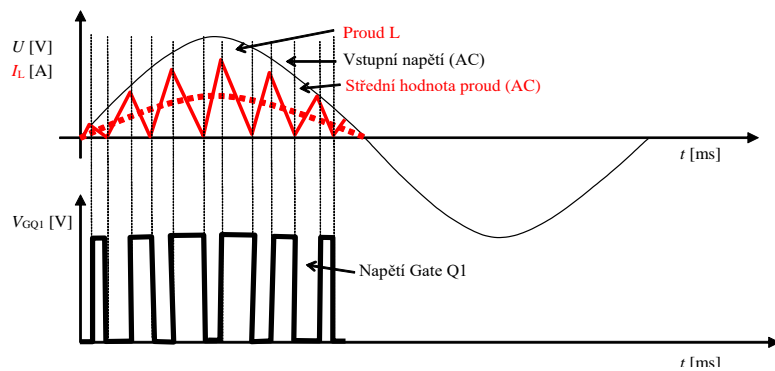


c)

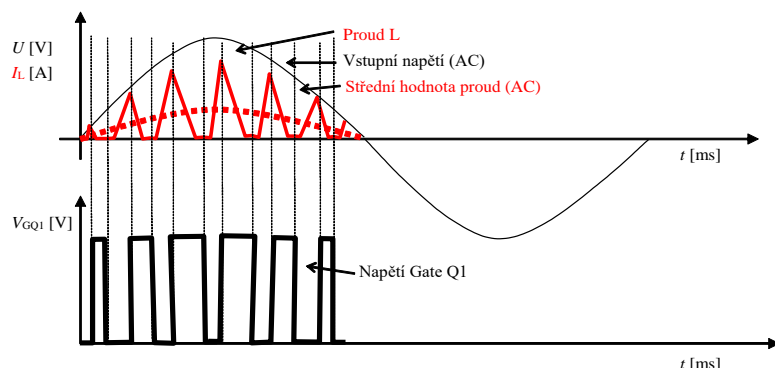
**Obr. 36** Principiální schéma uspořádání spínaného PFC obvodu: a) schéma zapojení obvodu a průchod proudu pro kladnou půlvnu vstupního napětí; b) schéma zapojení obvodu a průchod proudu pro zápornou půlvnu vstupního napětí; c) charakteristické časové průběhy veličin napětí a proudu pro PFC režim CCM.



**Obr. 37** Charakteristické časové průběhy veličin napětí a proudu pro PFC režim CCM.

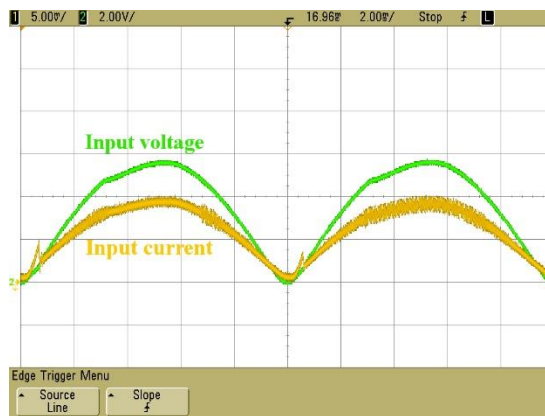
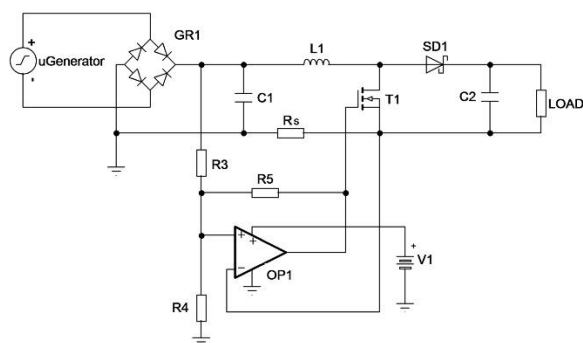


**Obr. 38** Charakteristické časové průběhy veličin napětí a proudu pro PFC režim CRM.

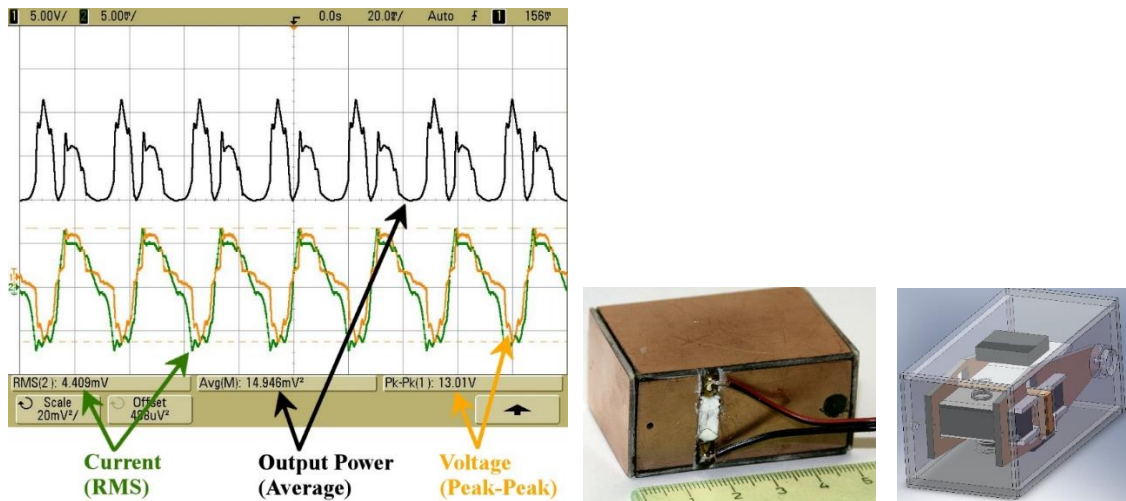


**Obr. 39** Charakteristické časové průběhy veličin napětí a proudu pro PFC režim DCM.

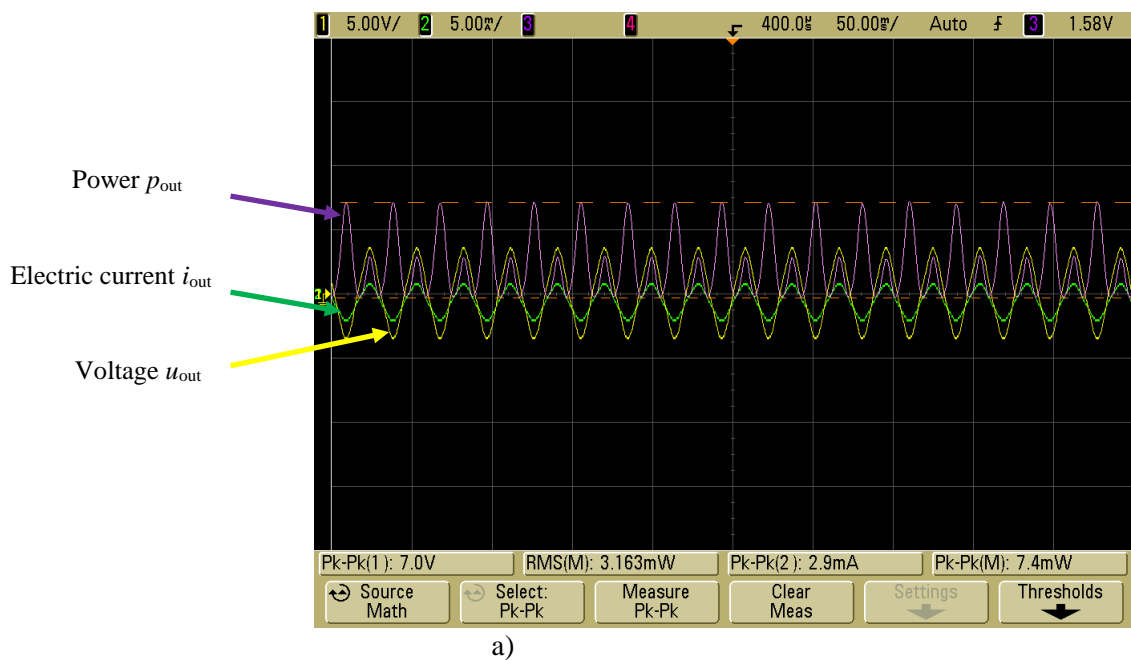
Podle těchto poznatků byly testovány pro rozdílné požadavky harvestorů PFC obvody. Příkladné provedení a testy s dosaženými parametry veličin jsou na obr. 40, 41 a 42. Zde jsou uvedeny jak schémata zapojení, tak naměřené průběhy pro nastavené počáteční podmínky a parametry testu.

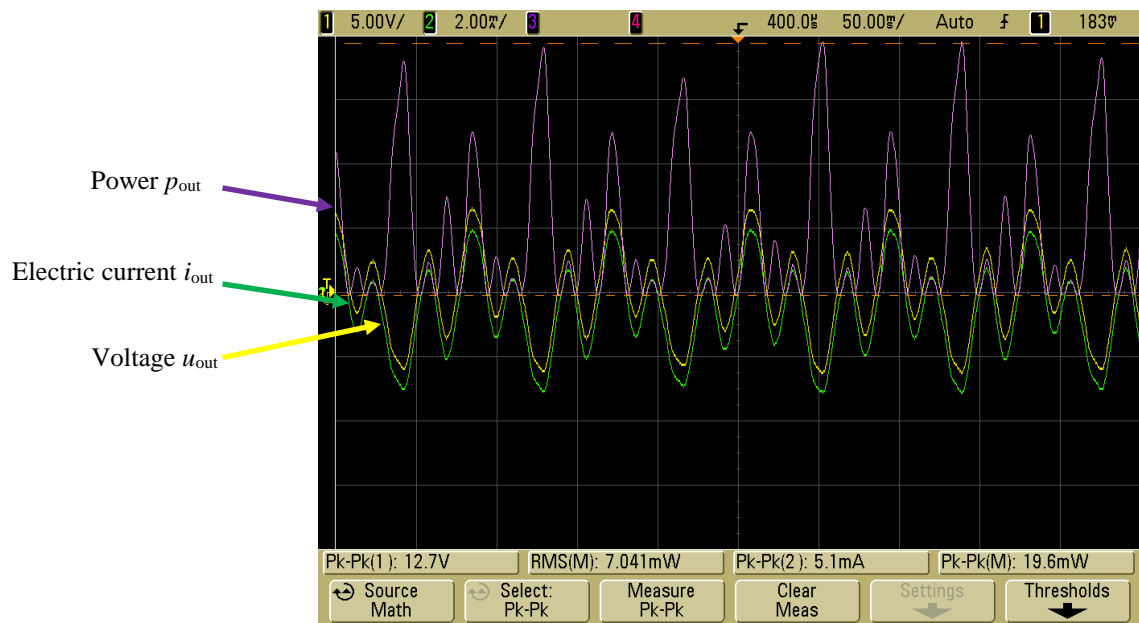


**Obr. 40** Charakteristické schéma PFC a časové průběhy naměřených veličin napětí a proudu experimentálního zapojení PFC [21].

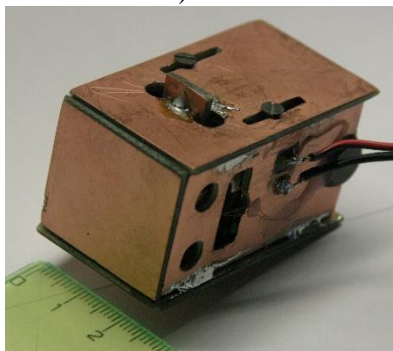


Obr. 41 Časové průběhy naměřených veličin napětí a proudu experimentálního zapojení PFC,  $P_{out} = 10 \text{ mW}$  [21].





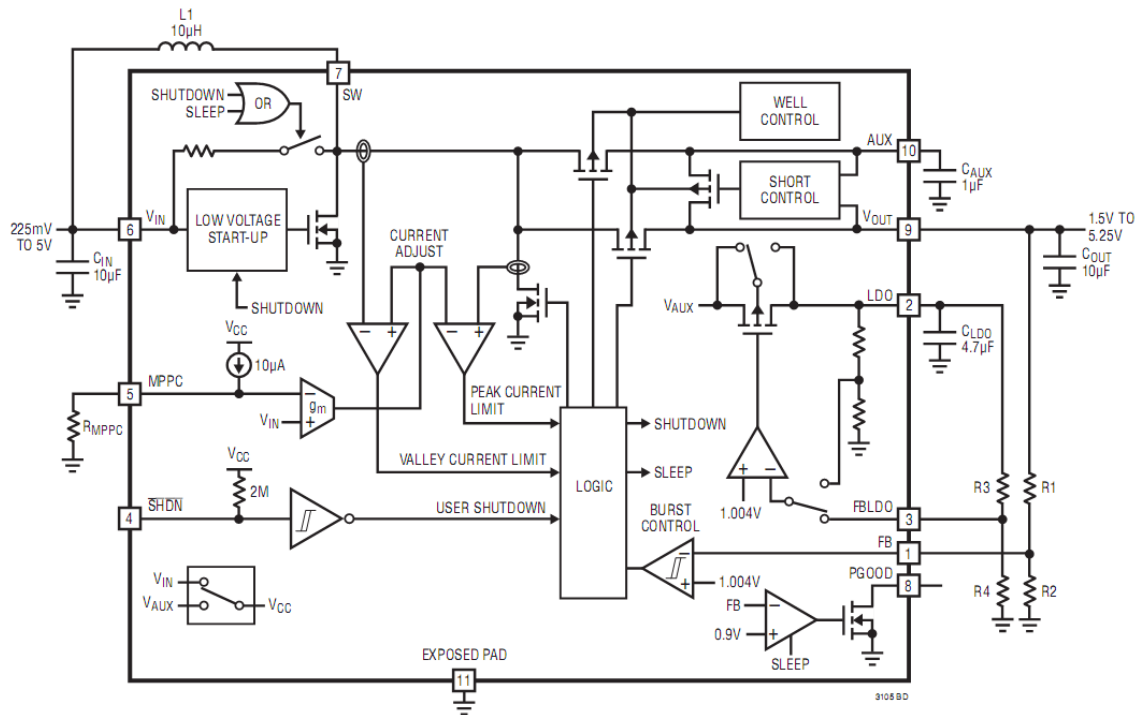
b)



c)

**Obr. 42** Časové průběhy naměřených veličin napětí a proudu experimentálního zapojení: a) pro výkon  $P_{out} = 3$  mW, b) pro výkon  $P_{out} = 7$  mW, PFC; c) harvester  $P_{out} = 10\text{--}20$  mW [27].

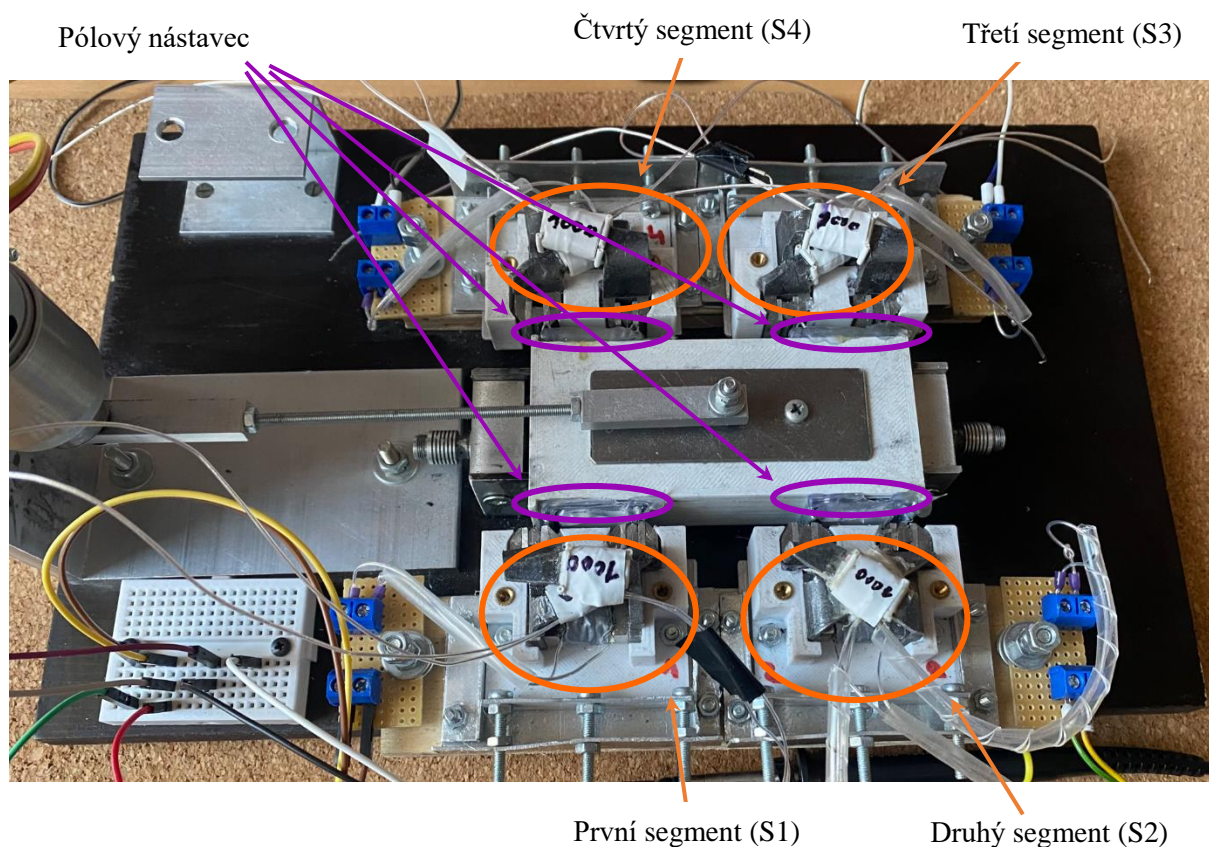
Lze pak dosáhnout posunutí okamžitých hodnot napětí a proudu tak, že odebíraný výkon je téměř činný. Příkladem je průběh naměřených hodnot z práce [28]. Pro nastavení a řízení výkonového obvodu s prvky PFC jsou již dostupné IO, například LTC3105 s vnitřní strukturou, obr. 43.



**Obr. 43** Převodník s řízením výkonu a účinníku LTC3105.

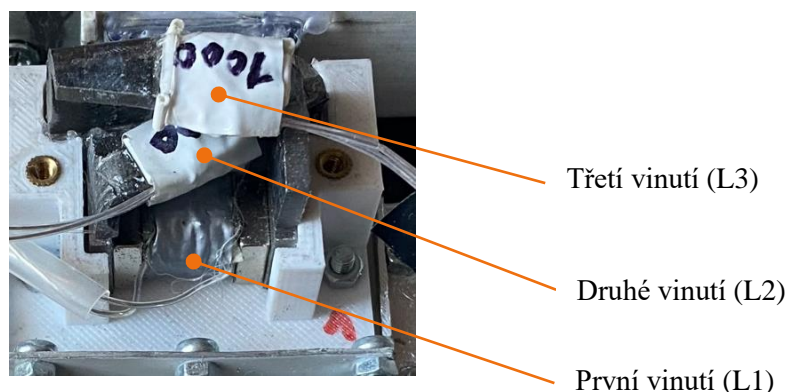
### Experimentální ověření parametrů segmentovaného generátoru a obvodů řízení jeho výkonu.

Navržený testovací segment generátoru se skládá ze dvou protilehlých magnetických obvodů magneticky vázaných jhem. Koncepce vychází ze schématického uspořádání na obr. 26. Generátor se sestává ze čtyř segmentů a každý segment využívá 3 cívky pro transformaci energie na elektrickou a to v obvodu se společným permanentním magnetem. Označení segmentů s okruhy cívek je na obr. 44.



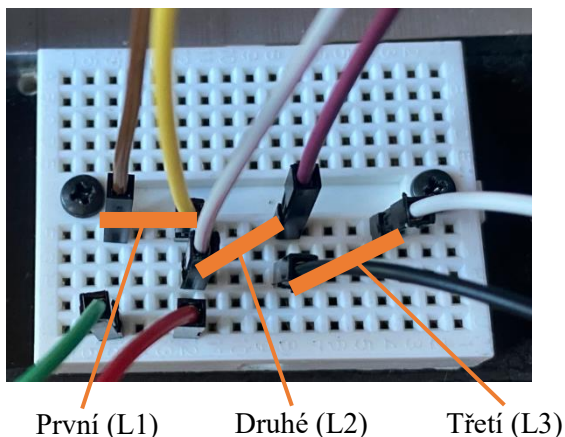
**Obr. 44** Uspořádání testovacího bloku se segmenty generátoru a jejich označení S1 až S4.

Detail segmentu je zobrazen na obr. 45. Odpovídá segmentu statické části z principiálního uspořádání z obr. 26, Segment I. Označení cívek s vinutím na daném segmentu je zachyceno na obr. 45, postupuje značením od dolní části směrem nahoru (L1, ..., L3). Nejnižší cívka má označení L1, nad ní je umístěna L2 a nejvyšší je L3. Cívky včetně permanentního magnetu jako zdroje magnetického toku jsou upevněny na pevné části (schéma z obr. 26a), pohyblivá část je pouze poloový nástavec, obr. 44.



**Obr. 45** Segment testovacího bloku generátoru, označení vinutí jednotlivých cívek elektrického vinutí.

Pro upevnění vývodů z jednotlivých cívek segmentu bylo použito nepájivé kontaktní pole. Důvodem byla snadná a rychlá manipulace se zapojením cívek při testech pro rozdílné způsoby konfigurace segmentu. Cívky byly zapojeny do série a to tak, aby výstupní okamžité hodnoty proměnného elektrického napětí dosahovaly maximální amplitudy. Ukázka zapojení vývodů cívek na nepájivém poli je na obr. 46.

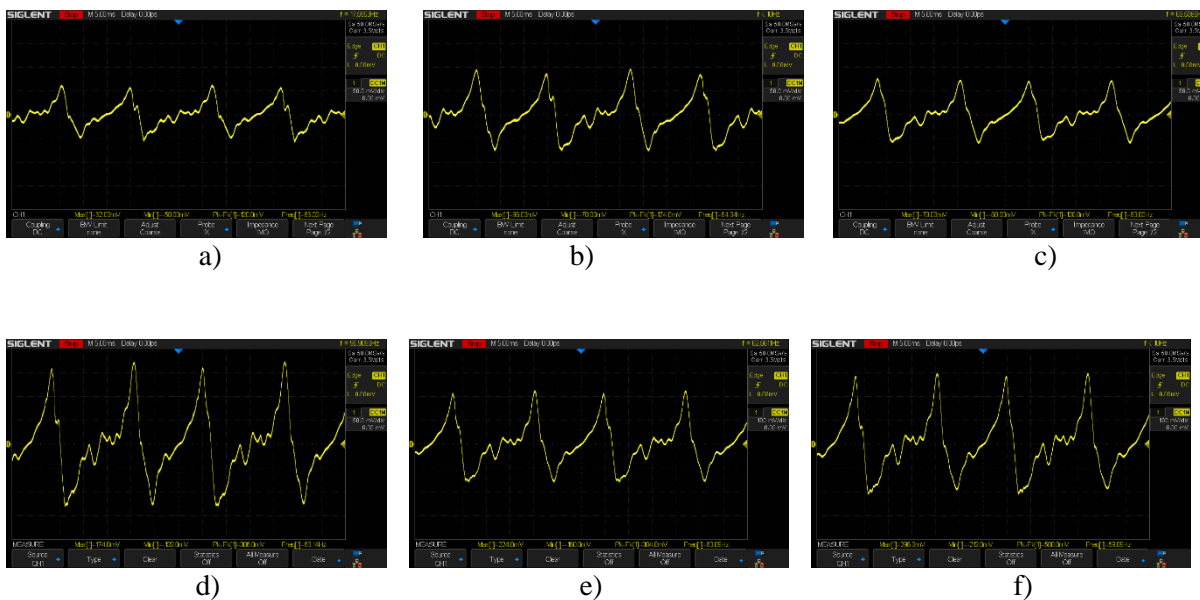


**Obr. 46** Příkladné zapojení a umístění vývodů cívek vinutí generátoru označených L1, L2 a L3.

Dále jsou uvedeny pouze příkladné oscilogramy z mnoha testů segmentu generátoru s uvedením parametrů nastavení budícího pohybu segmentu a elektrických parametrů dosažených na zátěži elektrické části obvodu.

### Segment 1, bez zátěže ve stavu naprázdno.

Změřené a zaznamenané průběhy elektrického napětí na svorkách cívek L1, ..., L3 prvního segmentu (S1) generátoru jsou na obrázcích 47 a) – 47 f). Na obr. 47 jsou vinutí cívek L1 – L3 zapojována postupně. Vinutí nejsou připojena na elektrickou zátěž a generátor tak pracuje ve stavu naprázdno. Maximum výstupního napětí všech tří cívek v sériovém zapojení (L1 + L2 + L3) naprázdno je  $U_{0L1,L2,L3} = +296 \text{ mV} / -212 \text{ mV}$ . Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66 \text{ m/s}$ .

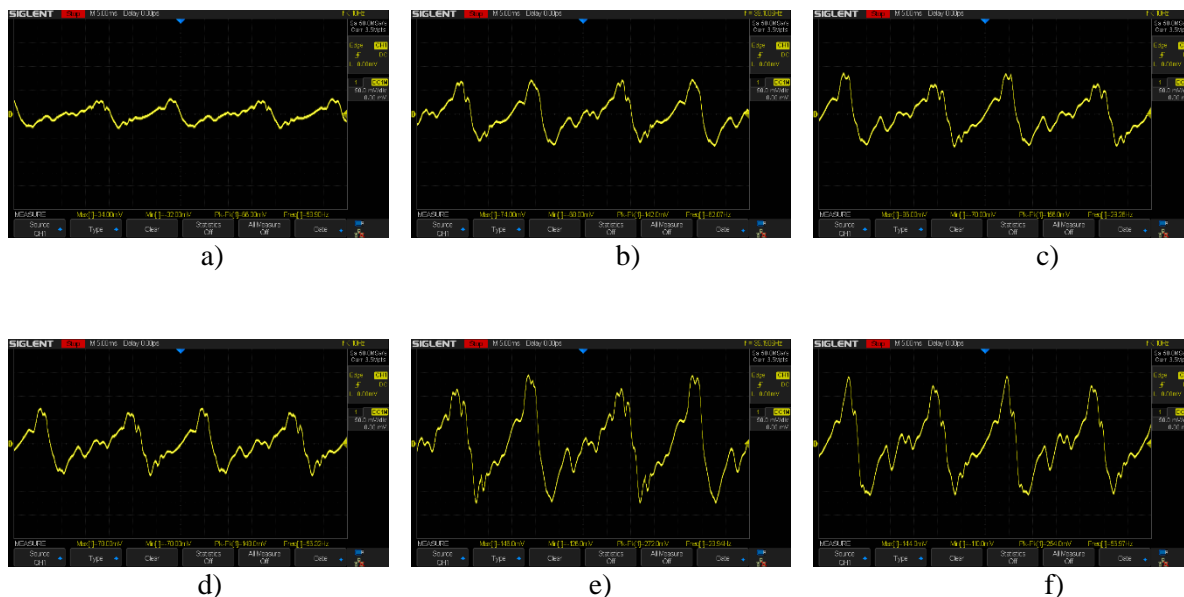


**Obr. 47** Okamžité hodnoty průběhů elektrického napětí na cívkách v prvním segmentu generátoru (S1): a) L1  $U_{\max} = (62/-58) \text{ mV}$ ; b) L2  $U_{\max} = (96/-78) \text{ mV}$ ; c) L3  $U_{\max} = (78/-60) \text{ mV}$ ; d) cívky L1+L2 v sérii  $U_{\max} = (174/-132) \text{ mV}$ ; e) cívky L2+L3 v sérii  $U_{\max} = (224/-160) \text{ mV}$ ; f) všechny tři cívky L1+L2+L3 v sérii  $U_{\max} = (296/-212) \text{ mV}$

Dále byl proveden test pro postupné vyhodnocení parametrů segmentu S1 a to s elektrickou zátěží na svorkách vinutí L1, ..., L3.

### Segment 1, zátěž $R_{z1} = 1 \text{ k}\Omega$ .

Změřené a zaznamenané průběhy elektrického napětí na svorkách cívek L1, ..., L3 prvního segmentu (S1) generátoru jsou na obrázcích 48 a) – f). Vinutí L1 – L3 jsou zapojována postupně k rezistivní zátěži  $R_{z1} = 1 \text{ k}\Omega$ . Maximum výstupního napětí všech tří cívek v sériovém zapojení (L1 + L2 + L3) se zátěží  $R_{z1}$  je  $U_{Rz1,L1,L2,L3} = +144 \text{ mV} / -110 \text{ mV}$ . Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66 \text{ m/s}$ .

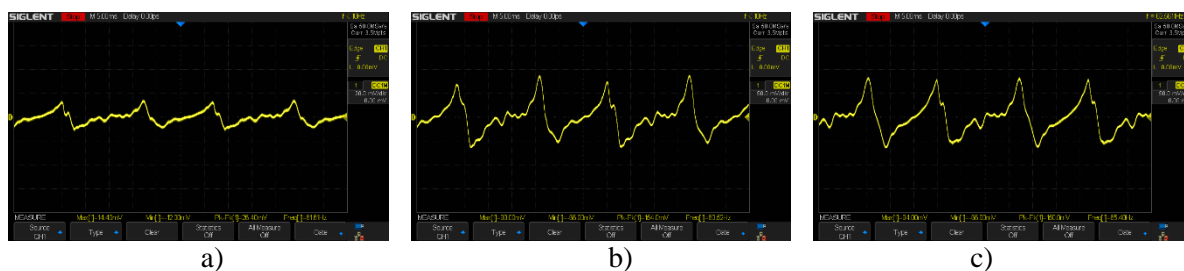


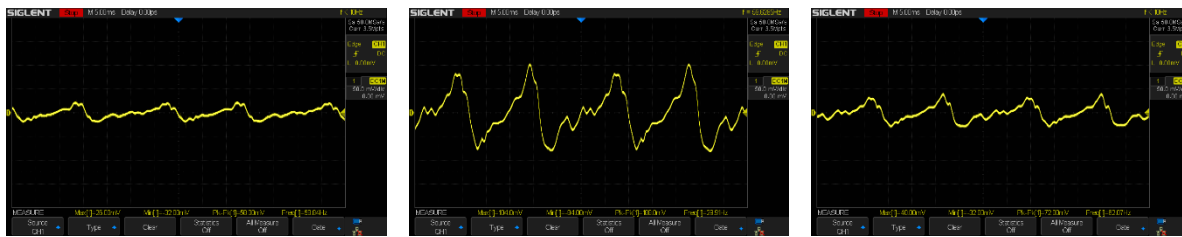
**Obr. 48** Okamžité hodnoty průběhů elektrického napětí na cívkách v prvním segmentu generátoru (S1): a) L1  $U_{\max} = (34/-32) \text{ mV}$ ; b) L2  $U_{\max} = (74/-68) \text{ mV}$ ; c) L3  $U_{\max} = (86/-70) \text{ mV}$ ; d) cívky L1+L2 v sérii  $U_{\max} = (78/-70) \text{ mV}$ ; e) cívky L2+L3 v sérii  $U_{\max} = (146/-126) \text{ mV}$ ; f) všechny tři cívky L1+L2+L3 v sérii  $U_{\max} = (144/-110) \text{ mV}$

Jako poslední test segmentu bylo provedeno měření parametrů segmentu S1 a to s elektrickou zátěží na svorkách vinutí L1, ..., L3.

### Segment 1, zátěž $R_{z2} = 150 \Omega$ .

Změřené a zaznamenané průběhy elektrického napětí na svorkách cívek L1, ..., L3 prvního segmentu (S1) generátoru jsou na obrázcích 49 a) – f). Vinutí L1 – L3 jsou zapojována postupně k rezistivní zátěži  $R_{z2} = 150 \Omega$ . Maximum výstupního napětí všech tří cívek v sériovém zapojení (L1 + L2 + L3) se zátěží  $R_{z2}$  je  $U_{Rz2,L1,L2,L3} = +40 \text{ mV} / -32 \text{ mV}$ . Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66 \text{ m/s}$ .





d)

e)

f)

**Obr. 49** Okamžité hodnoty průběhů elektrického napětí na cívkách v prvním segmentu generátoru (S1): a) L1  $U_{\max} = (14/-12)$  mV; b) L2  $U_{\max} = (88/-66)$  mV; c) L3  $U_{\max} = (84/-66)$  mV; d) cívký L1+L2 v sérii  $U_{\max} = (26/-32)$  mV; e) cívký L2+L3 v sérii  $U_{\max} = (104/-84)$  mV; f) všechny tři cívký L1+L2+L3 v sérii  $U_{\max} = (40/-32)$  mV

Obdobně bylo provedeno měření pro segmenty S2, S3 a S4. Potom stručné shrnutí parametrů je níže zaznamenáno.

### Segment 2, naprázdno

Měření na druhém segmentu generátoru (S2), vinutí postupně L1 – L3, bez zátěže (naprázdno). Výstupní napětí všech tří cívek v sériovém zapojení (L1 + L2 + L3) naprázdno je  $U_{\max} = +114$  mV/-88 mV. Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66$  m/s.

L1;  $U_{\max} = 18/-16$  mV, L2;  $U_{\max} = 52/-42$  mV, L3;  $U_{\max} = 46/-38$  mV.

### Segment 2, zátěž $R_{z1} = 1$ k $\Omega$

Měření na druhém segmentu generátoru (S2), vinutí postupně L1 – L3, zátěž  $R_{z1} = 1$  k $\Omega$ . Výstupní napětí všech tří cívek v sériovém zapojení (L1 + L2 + L3) při zátěži  $R_{z1} = 1$  k $\Omega$  je  $U_{\max} = +56$  mV/-44 mV. Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66$  m/s.

### Segment 2, zátěž $R_{z2} = 150$ $\Omega$

Měření na druhém segmentu generátoru (S2), vinutí postupně L1 – L3, zátěž  $R_{z2} = 150$   $\Omega$ . Výstupní napětí všech tří cívek v sériovém zapojení (L1 + L2 + L3) při zátěži  $R_{z2} = 150$   $\Omega$  je  $U_{\max} = +14$  mV/-14 mV. Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66$  m/s.

### Segment 3, naprázdno

Měření na třetím segmentu generátoru (S3), vinutí postupně L1 – L3, bez zátěže (naprázdno). Výstupní napětí všech tří cívek v sériovém zapojení (L1 + L2 + L3) naprázdno je  $U_{\max} = +88$  mV/-80 mV. Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66$  m/s.

L1;  $U_{\max} = 22/-22$  mV, L2;  $U_{\max} = 32/-32$  mV, L3;  $U_{\max} = 42/-34$  mV.

### Segment 3, zátěž $R_{z1} = 1$ k $\Omega$

Měření na třetím segmentu generátoru (S3), vinutí postupně L1 – L3, zátěž  $R_{z1} = 1$  k $\Omega$ . Výstupní napětí všech tří cívek v sériovém zapojení (L1 + L2 + L3) při zátěži  $R_{z1} = 1$  k $\Omega$  je  $U_{\max} = +50$  mV/-48 mV. Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66$  m/s.

### Segment 3, zátěž $R_{z2} = 150$ $\Omega$

Měření na třetím segmentu generátoru (S3), vinutí postupně L1 – L3, zátěž  $R_{z2} = 150$   $\Omega$ . Výstupní napětí všech tří cívek v sériovém zapojení (L1 + L2 + L3) při zátěži  $R_{z2} = 150$   $\Omega$  je  $U_{\max} = +14$  mV/-14 mV. Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66$  m/s.

#### **Segment 4, naprázdno**

Měření na čtvrtém segmentu generátoru (S4), vinutí postupně L1 – L3, bez zátěže (naprázdno). Výstupní napětí všech tří cívek v sériovém zapojení (L1 + L2 + L3) naprázdno je  $U_{\max} = +98 \text{ mV}/-92 \text{ mV}$ . Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66 \text{ m/s}$ .

L1 ;  $U_{\max} = 40/-28 \text{ mV}$ , L2 ;  $U_{\max} = 40/-36 \text{ mV}$ , L3 ;  $U_{\max} = 36/-38 \text{ mV}$ .

#### **Segment 4, zátěž $R_{z1}=1 \text{ k}\Omega$**

Měření na čtvrtém segmentu generátoru (S4), vinutí postupně L1 – L3, zátěž  $R_{z1} = 1 \text{ k}\Omega$ . Výstupní napětí všech tří cívek v sériovém zapojení (L1 + L2 + L3) při zátěži  $R_{z1} = 1 \text{ k}\Omega$  je  $U_{\max} = +56 \text{ mV}/-54 \text{ mV}$ . Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66 \text{ m/s}$ .

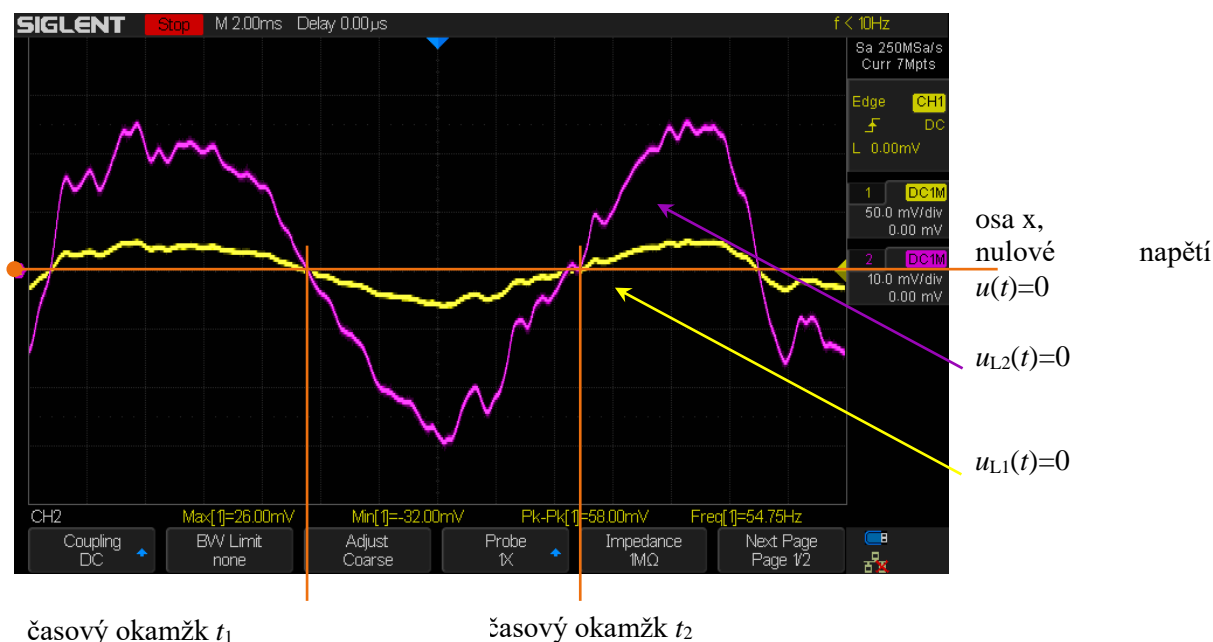
#### **Segment 4, zátěž $R_{z2}=150 \Omega$**

Měření na čtvrtém segmentu generátoru (S4), vinutí postupně L1 – L3, zátěž  $R_{z2} = 150 \Omega$ . Výstupní napětí všech tří cívek v sériovém zapojení (L1 + L2 + L3) při zátěži  $R_{z2} = 150 \Omega$  je  $U_{\max} = +18 \text{ mV}/-18 \text{ mV}$ . Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66 \text{ m/s}$ .

Výše uvedené testy stanovily maximální dosažená napětí při různých zapojení vinutí a zátěžích s nastavenou rychlostí pohybu pohyblivé části  $v$ . Dále byl prováděn test na parametr fázového posunu jak okamžitých průběhů proměnného výstupního napětí tak elektrického proudu se zatížením vinutí L1,..L3. Generátor se ale skládá ze segmentů. V našem testovacím zařízení, obr. 44 se jedná o minimum segmentů S1 až S4. Při kombinaci segmentů závisí na tolerancích mechanického uspořádání pohyblivé části a statické segmentů S1 až S4. Tyto tolerance mohou způsobit jisté rozdíly v okamžitém průběhu elektrického napětí vinutí cívek a tak fázové posuny zapříčiní snížení efektivity transformace pohybové energie na elektrickou, jak bylo teoreticky zachyceno na obr. 16.

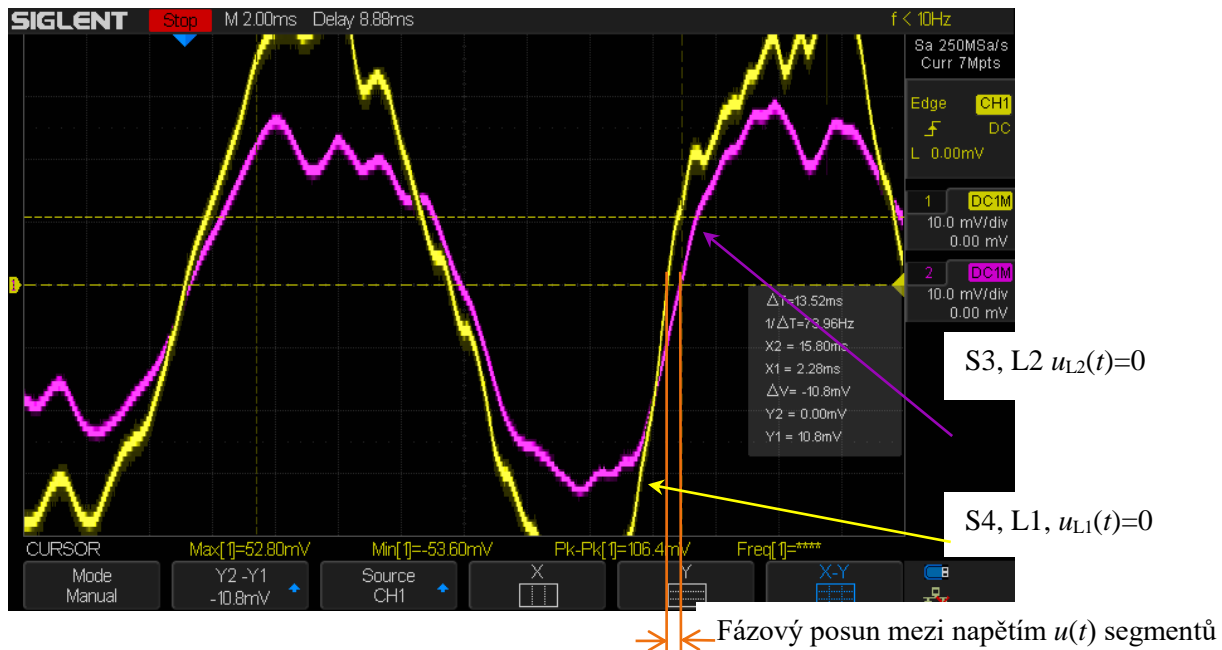
#### **Fázový posun okamžitých hodnot veličin mezi segmenty S1 až S4, rozdílný průběh hodnot okamžitého elektrického napětí.**

Jednotlivý segment, například S1, má jeden společný pólový nástavec, mění se magnetický tok ve všech třech jeho vinutích cívek L1,..,L3 ve stejný časový okamžik. Lze tvrdit, že střídavé napětí cívek L1, L2, L3 protínají časovou osu v nulovém napětí ve stejný okamžik  $t$ , lze tedy zjednodušeně hovořit že jsou ve fázi. Není zde mezi veličinami časový posun, jak je ukázáno na obr. 50. V tomto obrázku je zobrazen průběh okamžitých hodnot elektrického napětí na svorkách vinutí naprázdno segmentu S4 cívek L1 a L2. Je patrné, že průběhy protínají nulové hodnoty pro sledované napětí ve stejný časový okamžik (žlutý průběh L1, fialový L2). Zdrojem pohybu pohyblivé části generátoru byl nastavitelný generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66 \text{ m/s}$ .



**Obr. 50** Okamžité hodnoty časové závislosti napětí  $u(t)$  cívek L1 a L2 segmentu S1.

Pro jeden segment je tedy nastavení superpozice okamžitých hodnot elektrického napětí optimální. Ovšem při zapojení a superpozici více segmentů, v našem testovaném případě S1, S2, S3, S4, již může docházet k časovému posunu snímaných a superponovaných veličin k tzv. fázovému posunu. Důvodem je výrobní tolerance a uspořádání jednotlivých segmentů vůči sobě. Pólové nastavení neuzavírají magnetický tok ve stejném časovém okamžiku  $t_x$  a tím dochází k posunu v časové ose okamžitých hodnot elektrických napětí. Může tak dojít snadno k neočekávaným efektům jako je odečítání kladné a záporné napěťové hodnoty ve sledovaném okamžiku  $t_{x1}$ . Příkladem může být záznam zachycený na obr. 51, který zobrazuje průběh okamžitých hodnot napětí naprázdno na svorkách cívky L1 segmentu S4 a napětí na svorkách cívky L3 segmentu S3. V tomto záznamu lze odečíst časový rozdíl při průchodu nulou mezi jednotlivými údaji napětí  $dU = 10$  mV. Výsledné napětí se při superpozici všech segmentů a vinutí takto sníží. Na obr. 51 je žlutý průběh pro segment S4 a cívku L1, fialový pro segment S3 a cívku L2.

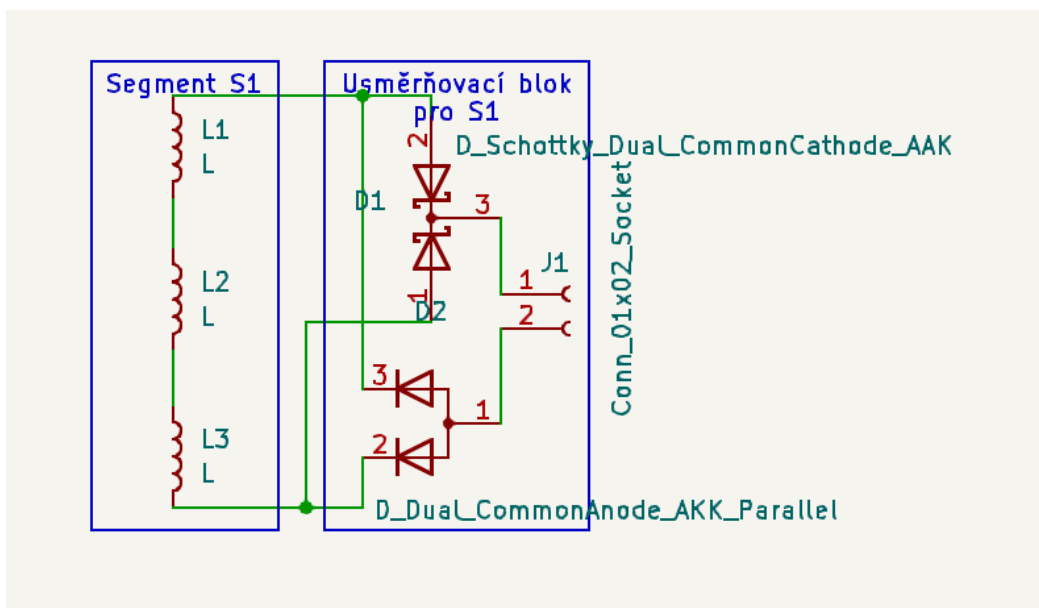


**Obr. 51** Průběh okamžitých hodnot elektrických napětí z cívek rozdílných segmentů.

Návrhem jak provést optimální superpozici všech segmentů S a vinutí L generátoru je využít můstkového usměrnění elektrického napětí každého segmentu zvlášť, jak je schématicky naznačeno na obr. 52a). Takto opravené výstupy segmentů generátorů lze beze ztrát v oblasti u okamžitých hodnot napětí  $u(t)$  v sériovém zapojení superponovat. Tím se budou počítat hodnoty buď pouze v kladné nebo záporné části průběhů napětí. Experimentálně bylo ověřeno na zřízení z obr. 52 b).

Nevýhodou tohoto řešení je úbytek napětí  $dU_m$  na každém použitém usměrňovacím můstku, obr. 51a). Pokud se generuje na segmentu S z vinutí L elektrické napětí  $u(t) < dU_m$  nedochází k výslednému usměrnění napětí a na výstupu je minimální napětí blízké se nule. Tento nedostatek lze zmírnit při použití diod s nízkým úbytkem napětí  $U_f$  (Schotky dioda). V testu byly použity diody Semtech MBR0520L s úbytkem napětí v propustném směru  $dU_f = 250$  mV. Pro nastavené parametry testovacího přípravku (generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66$  m/s) docházelo ke zřetelnému úbytku napětí na každém jednotlivém usměrňovacím segmentu. Na obr. 53. a obr. 54 jsou průběhy usměrněného napětí můstkem segmentu S1 a S2. Segment S1 dodává vyšší výstupní napětí vzhledem ke zbylým třem segmentům S2, S3 a S4. Tyto rozdíly vyplývají z dodržení tolerancí výroby, nastavení přesnosti vzduchových mezer a dalších.

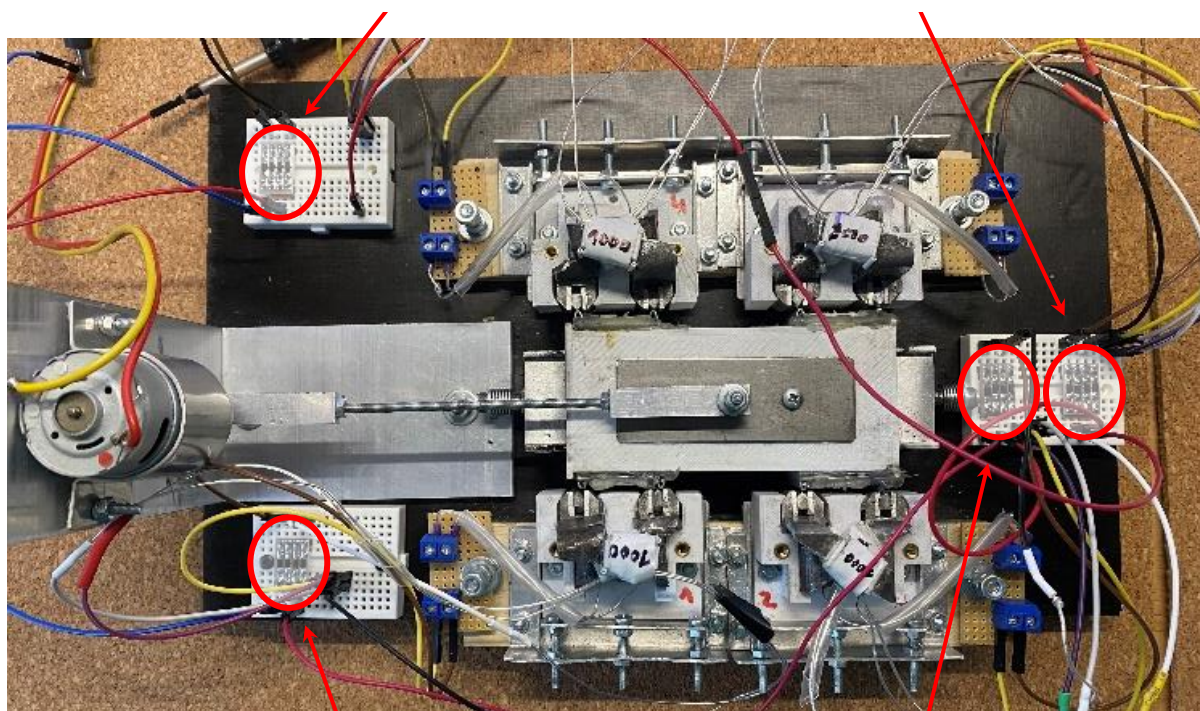
Odstranit tyto nevýhody lze jak dodržáním přesnosti nastavení ale zejména konstrukcí segmentů. Lze jednak vyrobit cívky L1, ..., L3 jiných parametrů (tvar pólových nástavců, materiál pólových nástavců, tvar a materiál pohyblivé části magnetického obvodu atp.), pak také lze nastavit jinou rychlost generátoru vibrací s rychlostí  $v$ .



a)

Můstkový usměřovač (S4)

Můstkový usměřovač (S3)

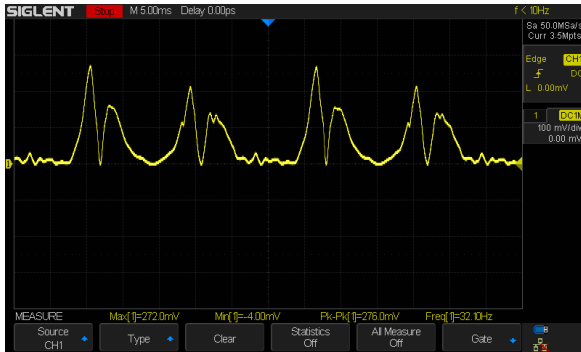


Můstkový usměřovač (S1)

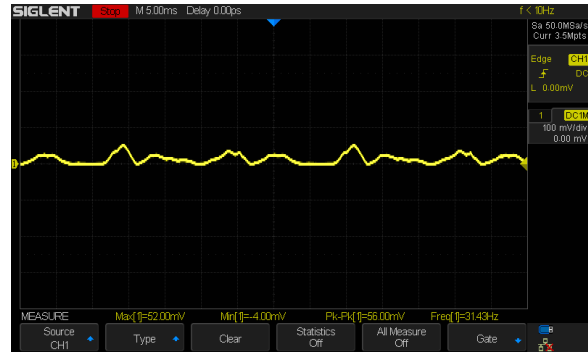
Můstkový usměřovač (S2)

b)

**Obr. 52** Nastavení přípravku se segmenty s můstkovými usměřovači, a) schéma zapojení můstkového usměřovače, b) experimentální testovací zařízení harvestoru se 4 segmenty



**Obr. 53** Můstkové usměrnění okamžité hodnoty napětí  $u_{S1}(t)$  segmentu S1.

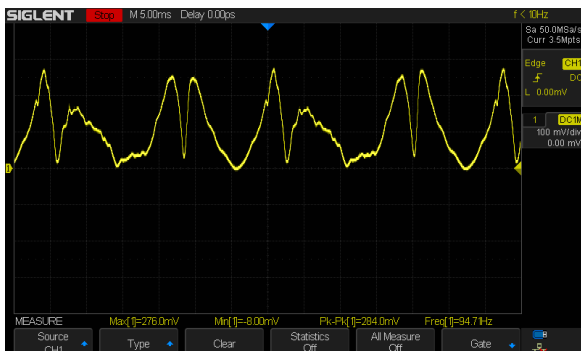


**Obr. 54** Můstkové usměrnění okamžité hodnoty napětí  $u_{S2}(t)$  segmentu S2.

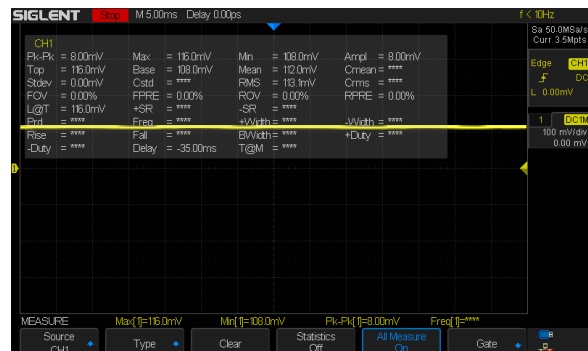
**Tab. 4** Vyhodnocení maximálních velikostí usměrněných napětí segmentů testovaného generátoru.

Segment S1	Segment S2	Segment S3	Segment S4
$U_{\max} = 272/-4 \text{ mV}$	$U_{\max} = 52/-4 \text{ mV}$	$U_{\max} = 40/-8 \text{ mV}$	$U_{\max} = 56/-8 \text{ mV}$

Pokud se tedy provede superpozice (součet) usměrněných složek napětí ze všech čtyř segmentů S1,...,S4, tabulka Tab.4, je výsledné napětí výstupu generátoru  $U_{\text{gen}S1,S2,S3,S4} = 276/-8 \text{ mV}$ , jak je ukázáno na obr. 55. Při použití vyhlazovacího kondenzátoru  $C_v = 47 \text{ uF}$  je výstupní napětí  $U_{\text{gen}} = 116/108 \text{ mV}$ , střední napětí  $U_{\text{gen,stř}} = 112 \text{ mV}$ , obr. 56. Všechna výstupní napětí jsou pro tento případ uvažována bez elektrické zátěže, tedy ve stavu naprázdno.

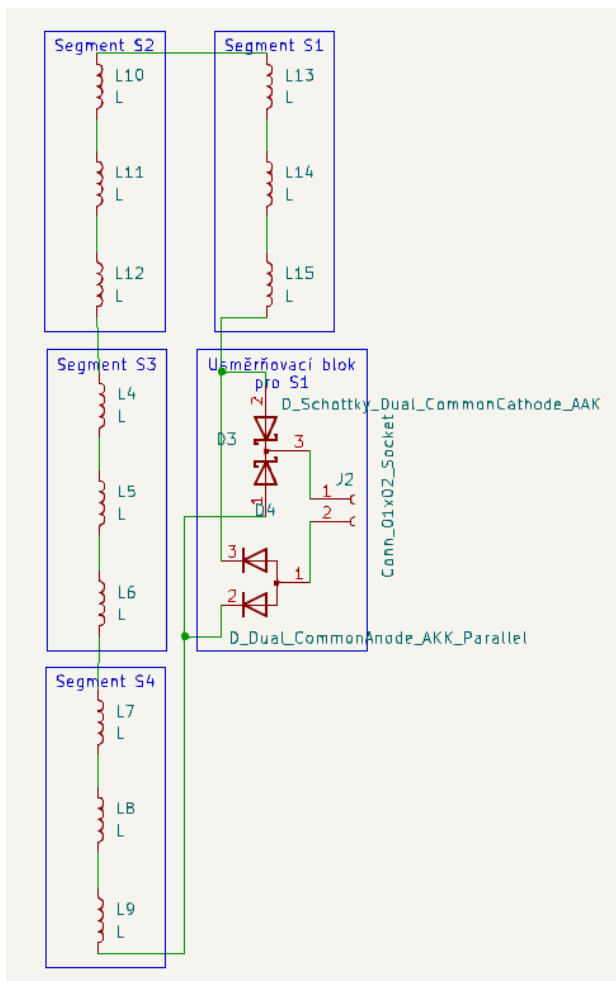


**Obr. 55** Superpozice usměrněných napětí všech segmentů S1,...,S4 čtyřmi můstkovými usměrňovači.

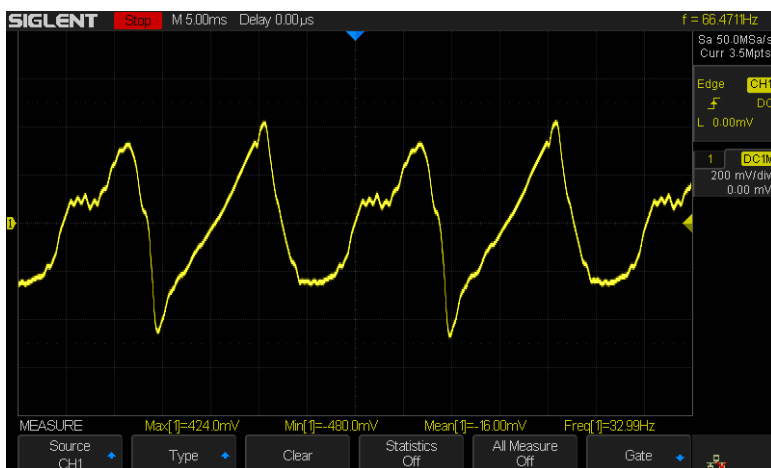


**Obr. 56** Průběh napětí nezatíženého generátoru při použití vyhlazovacího kondenzátoru  $C_v$ .

Dalším přístupem pro řešení parametrů generátoru obdobných uvedenému testovacímu vzorku spočívá v jiném způsobu konfigurace superponování napětí segmentů. Lze superponovat střídavá napětí zapojením segmentů do série s respektováním časových zpoždění okamžitých hodnot napětí výstupů jednotlivých vinutí cívek L1, ..., L3, obr. 57a. Takto získané celkové časově proměnné napětí lze opět usměrnit můstkovým usměrňovačem. Na testovaném vzorku seskupení generátoru za obvyklých podmínek (generátor vibrací s rychlostí  $v = 0.66 \text{ m/s}$ ) lze dosáhnout vyšších úrovní výstupního napětí vzhledem k předchozímu řešení. Důvodem je snížení úbytku napětí na každém můstku segmentu generátoru. Celkové výstupní časově proměnné napětí naprázdno je  $U_{\text{gen}} = 424/-480 \text{ mV}$ , jak je zaznamenáno na obr. 58.

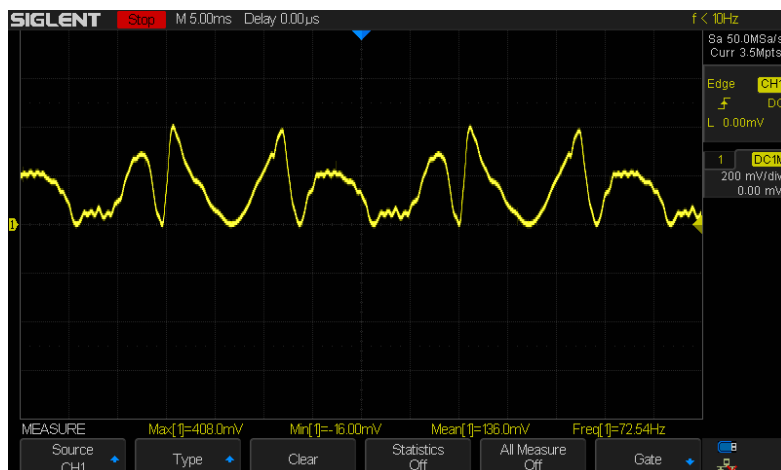


a)



b)

**Obr. 57** Zapojení a výstupní napětí: a) konfigurace generátoru a usměrňovače; b) časový průběh celkového výstupního střídavého napětí  $u_{\text{gen}}(t)$  generátoru čtyř sériově řazených segmentů S1, ..., S4.



**Obr. 58** Časové rozložení celkového usměrněného výstupního napětí  $u_{\text{gen,d}}(t)$  jedním můstkovým usměrňovačem.

Pro tento způsob řazení segmentů je celkové usměrněné napětí jedním můstkovým usměrňovačem, obr. 57a, na hodnotě  $U_{\text{gen}} = 408/-16$  mV a je zobrazeno na obr. 58. Opět při použití vyhlazovacího kondenzátoru  $C_v = 47$  uF pak je výstupní napětí  $U_{\text{gen}} = 160/148$  mV a střední hodnota napětí  $U_{\text{gen,str}} = 152$  mV, obr. 59.

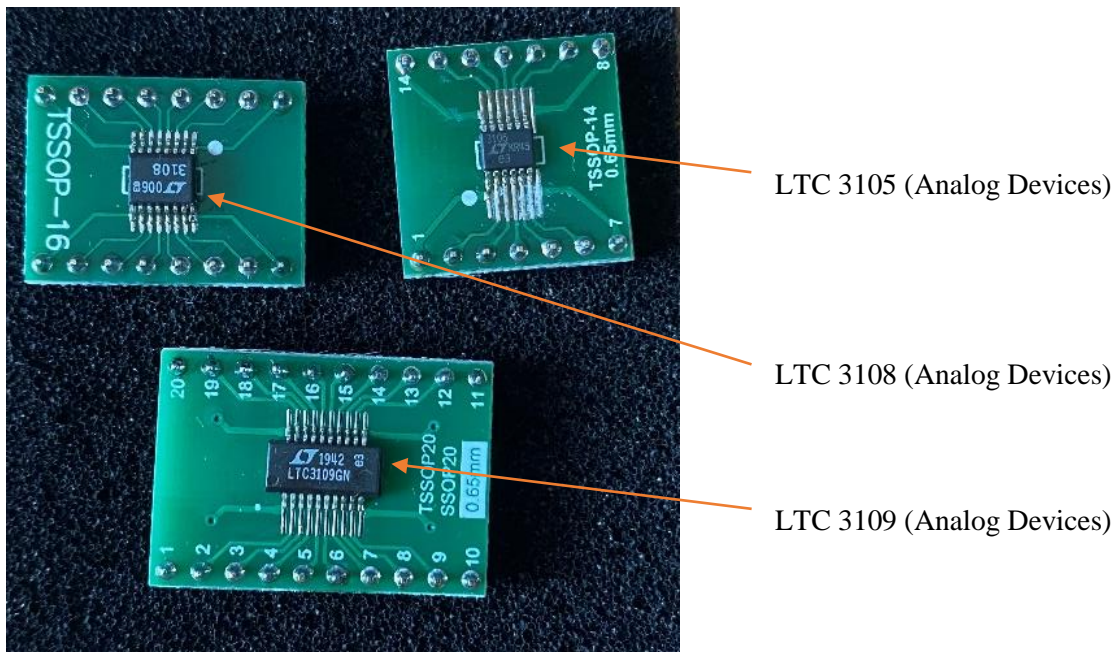


**Obr. 59** Výstupní napětí generátoru s řazením segmentů do série a jedním usměrňovacím můstkem s využitím vyhlazovacího kondenzátoru  $C_v = 47$  uF.

Jak bylo zmíněno, na využití přístupů a kombinací segmentů v generátoru a nasazení usměrňovacích bloků má vliv více parametrů generátoru. Jsou tedy případy, ve kterých se volí optimální nastavení počtu usměrňovacích můstků a závisí na dosahovaných maximech napětí cívek segmentů.

Pokud bychom v konstrukci generátoru pracovali s napětími výstupu cívek řádově v rozsahu desítek až stovek mV, nabízí se možnost použití obvodů pro správu napájení. Ty dokáží nejen zlepšit kompenzaci účinníku (PFC), ale konvertovat tato malá napětí na hodnoty dále využitelné např. pro IoT senzory. Typické obvody pro správu napájení – PMIC obvody (Power Management Integrated Circuit) jsou například nyní k dispozici od firmy Analog Devices LTC3105, LTC3108 a LTC3109, obr. 60.

Pro námi testovaný generátor se obvod LTC3105 (obsahuje step-up měnič s MPPT regulátorem) jeví jako méně vhodný. Navržený testovaný generátor se segmenty S1, ..., S4 je lineární zdroj energie a je pro aplikaci s obvodem LTC3105 příliš měkký zdroj s nedostatkem proudu. Obvod LTC3105 potřebuje pro svůj spolehlivý rozběh  $I_{\text{start}} = 30$  mA a napětí alespoň  $U_{\text{start}} = 1$  V. Testovaný generátor se čtyřmi segmenty tyto parametry nemá a proto není schopen je za daných nastavení a provedení dodat. U generátoru je výstupní napětí naprázdno v oblasti  $U_{\text{start,gen}} = 100\text{--}200$  mV.



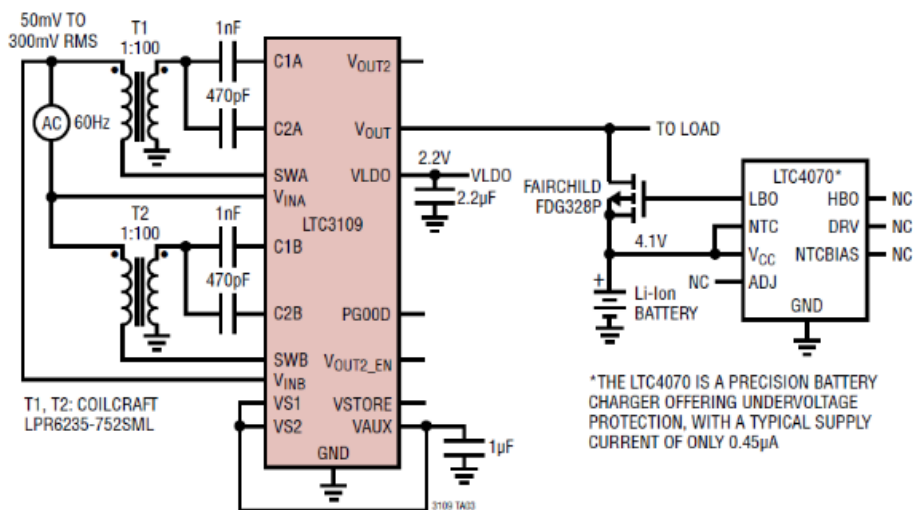
**Obr. 60** Obvody pro správu napájení od firmy Analog Devices, rok 2025.

Dalším PMIC zkušebním obvodem byl LTC3108, který s použitím speciálního transformátoru na vstupu poskytuje parametr extrémně nízkého vstupního napětí  $U_{\text{start}} = 20 \text{ mV}$ . Typickým zdrojem vstupního napětí pro tento obvod je doporučení výrobce v podobě termoelektrických (Peltierových) článků. Použití testovaného generátoru se segmenty S1,...,S4 jako zkušebního zdroje při vstupním napětí pro rozběh již při  $U_{\text{start}} = 50 \text{ mV}$  bylo úspěšné. Ovšem plné funkce obvodu bylo dosaženo až při hladině vstupního napětí na  $U_{\text{gen}} = 230 \text{ mV}$ . Ani u tohoto obvodu se nepodařilo testovaným lineárním generátorem spustit jeho plnou funkci, protože se nepodařilo rozběhnout oscilátor na vstupu tvořený vstupním transformátorem a kondenzátorem. Při připojení segmentovaného řešení lineárního generátoru na vstup obvodu kleslo jeho napětí  $U_{\text{gen}} = 6,8 \text{ mV}$ , což nestačilo k plnému rozběhu obvodu LTC3108.

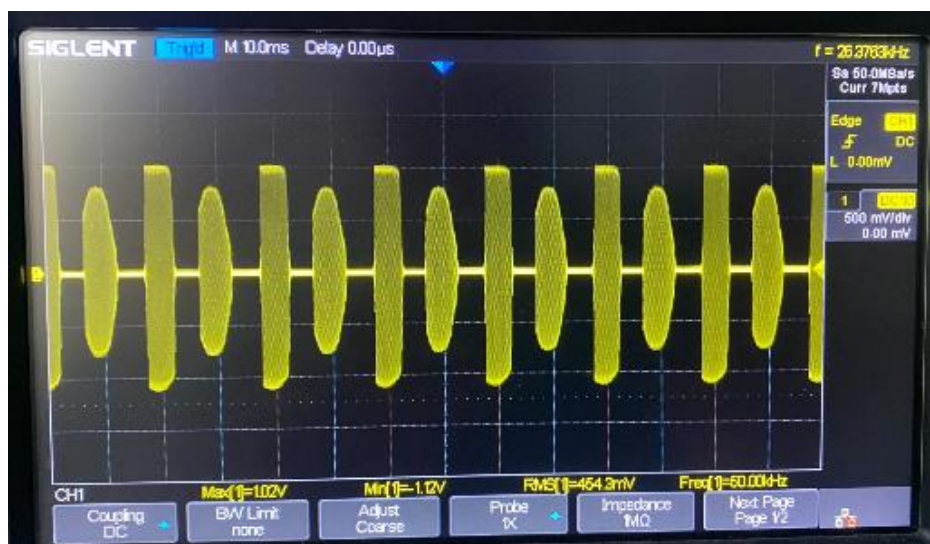
Při použití obvodu LTC3109 byla situace podobná, testovaný lineární generátor za daných parametrů nebyl schopen obvod plně zprovoznit. Výhodou obvodu LTC3109 vzhledem k typům LTC3108 je možnost využití již střídavého napětí generátoru  $U_{\text{gen}}$ , a není nutné střídavý signál usměrňovat. Obvod LTC3109 využívá dvou vstupních transformátorů a střídavého průběhu od  $U_{\text{gen}} = 50 \text{ mV}$ . Schéma příkladu zapojení s obvodem LTC3109 se vstupním střídavým napětím je na obr. 61.

Při zkoušce s vyšším střídavým napětím přivedeným na vstup transformátorů obvodu LTC3109 můžeme sledovat rozběh vstupního obvodu s transformátory. Ty se vstupními kondenzátory, obr. 62, tvoří oscilátor. Nevýhodou zapojení je stav, který může nastat při nedostatečném proudu na vstupu obvodu (vysoký vnitřní odpor generátoru) způsobí utlumení oscilátoru transformátoru obr. 62. Přitom na vstupní obvod transformátorů bylo přivedeno střídavé napětí  $U_{\text{start,ef}} = 7,8 \text{ V}$  a frekvence  $f = 50 \text{ Hz}$ .  $I_{\text{gen}} = 16 \text{ mA}$ , což nestačilo pro rozběh a trvalý chod obvodu.

### Li-Ion Battery Charger and LDO Operates from a Low Level AC Input



**Obř. 61** Obvod LTC3109 s možností přivedení přímo střídavého signálu [230].

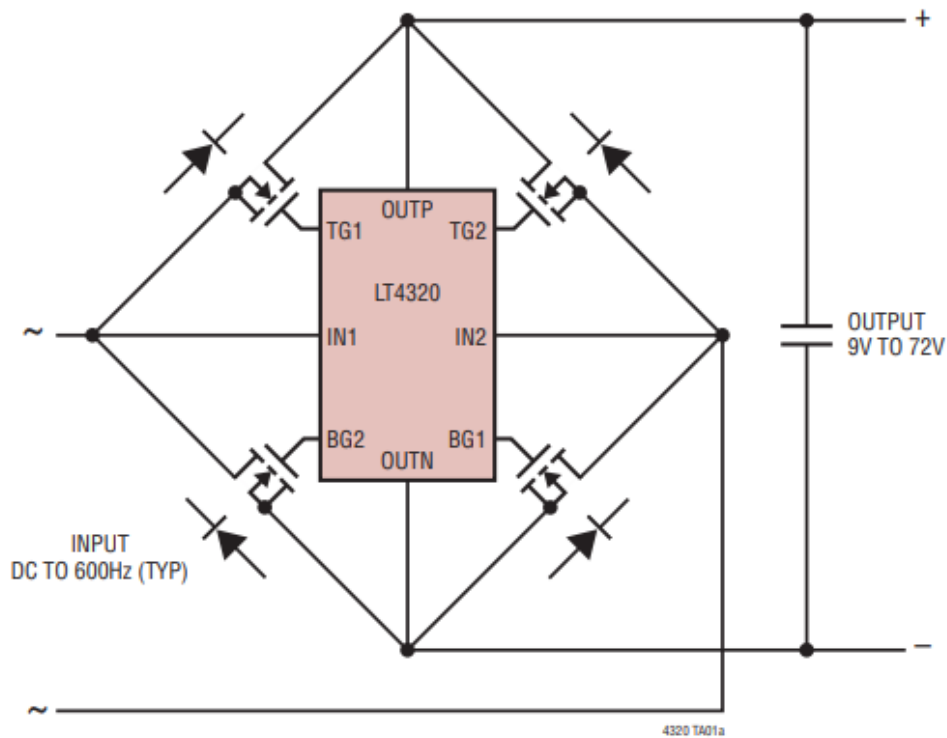


**Obř. 62** Rozběh a ztlumení obvodu oscilátoru zapojení s LTC3109

Měření s PMIC obvody LTC3105, 3108 a 3109 ukázalo, že důležité je nejen vstupní napětí na těchto obvodech, ale i vnitřní odpor generátoru a v důsledku pak proud, který je generátor na vstupu schopen dodat. Náš testovaný segmentový lineární generátor dodává proud  $I_{gen} = 10\text{--}30\text{ uA}$ , při zátěži  $R_{z2} = 150\ \Omega$  je schopen dodat  $I_{gen,150} = 740\text{ uA}$ . To na požadavek obvodu a následnou činnost LTC obvodů nestačí. Pro generátory s více segmenty a jinou konstrukcí cívek  $L_1, \dots, L_3$  ale může být velmi zajímavým řešením.

Dalším směrem návrhu řešení může být zvýšení usměrněného napětí. Toho lze dosáhnout díky použití MOSFET usměrňovače, místo Schottkyho diod. Můstek s MOSFET spínacími prvky je využíván především pro vyšší proudy usměrnění či spínání a velkých rozsahů napětí. Můstek je používán v aplikacích, ve kterých výkonová ztráta hraje důležitou roli v efektivitě přeměny a minimalizaci tepla na MOSFET prvcích. I když úbytek napětí na MOSFET tranzistorech je pouze řádu desítek mV, přesto bychom pro aplikaci testovaného lineárního generátoru s výstupem řádově desítek uA příliš nezvýšili efektivitu výtěžnosti generátoru. Samotný obvod LT4320 pro řízení MOSFET tranzistorového můstku potřebuje pro svoji činnost desítky uA. Je to ale zajímavá alternativa pro vícesegmentové řešení generátorů s vyššími proudy či napětími na výstupu, při dosažení úbytku napětí

na usměrňovací jednotce. Typickým obvodem ideálního řadiče s MOSFET tranzistorem je LT4320, opět základní zapojení je na obr. 63.



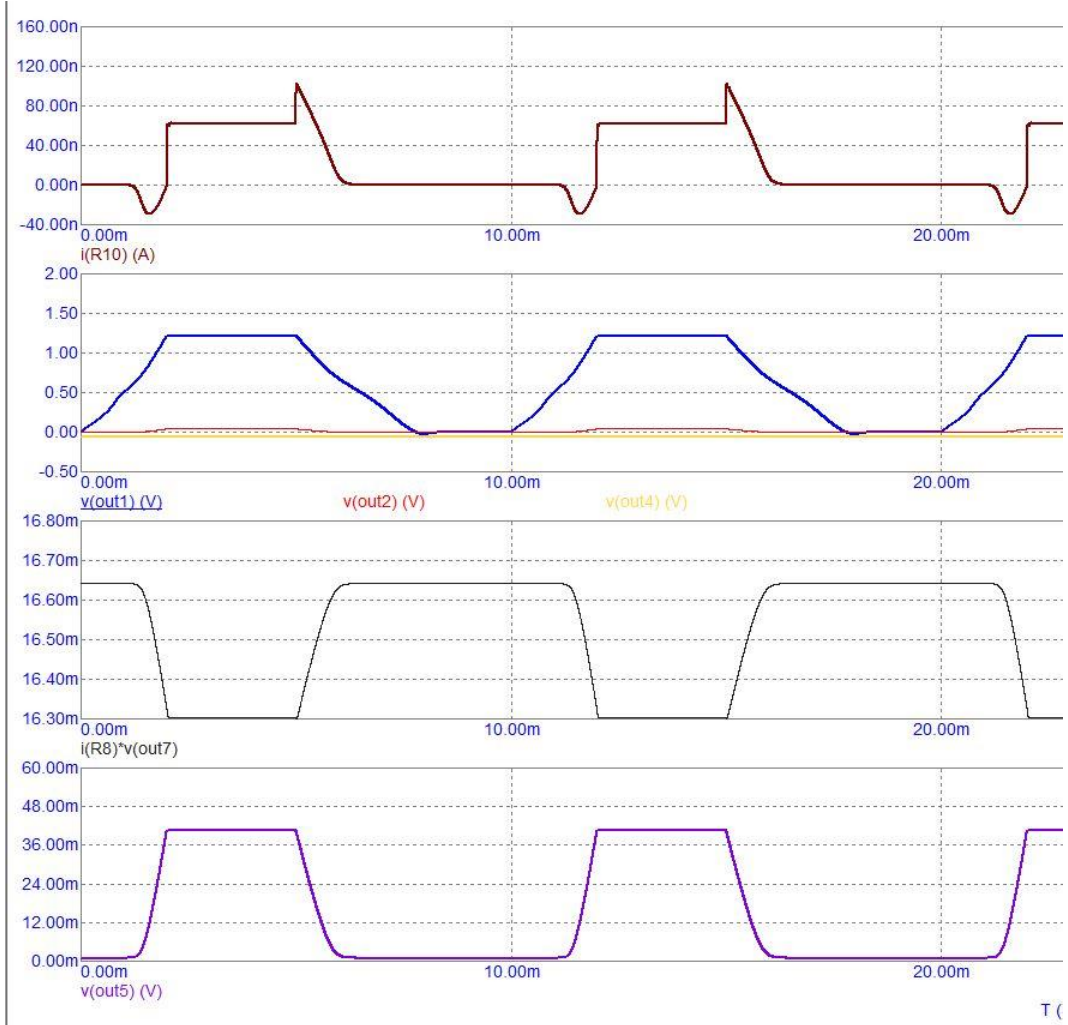
**Obr. 63** Typické zapojení řadiče LT4320 ideálního diodového můstku s MOSFET tranzistorem [231].

Dále byla v práci pozornost řízení výkonu generátoru zaměřena na využití PFC obvodů pro efektivní získání výkonu lineárního generátoru. PFC obvod byl modelován a simulován v programu Micro-Cap, r. 12. Jeho funkce byla ověřena sestavením obvodu na nepájivém poli a po odzkoušení pak byl navržen obvod na PCB desce. Schéma zapojení PFC obvodu v Micro-Capu simulátoru je na obr. 64 a odpovídající sledované časové závislosti průběhů v jednotlivých místech obvodu jsou zobrazeny na obr. 65, 66 a 67.

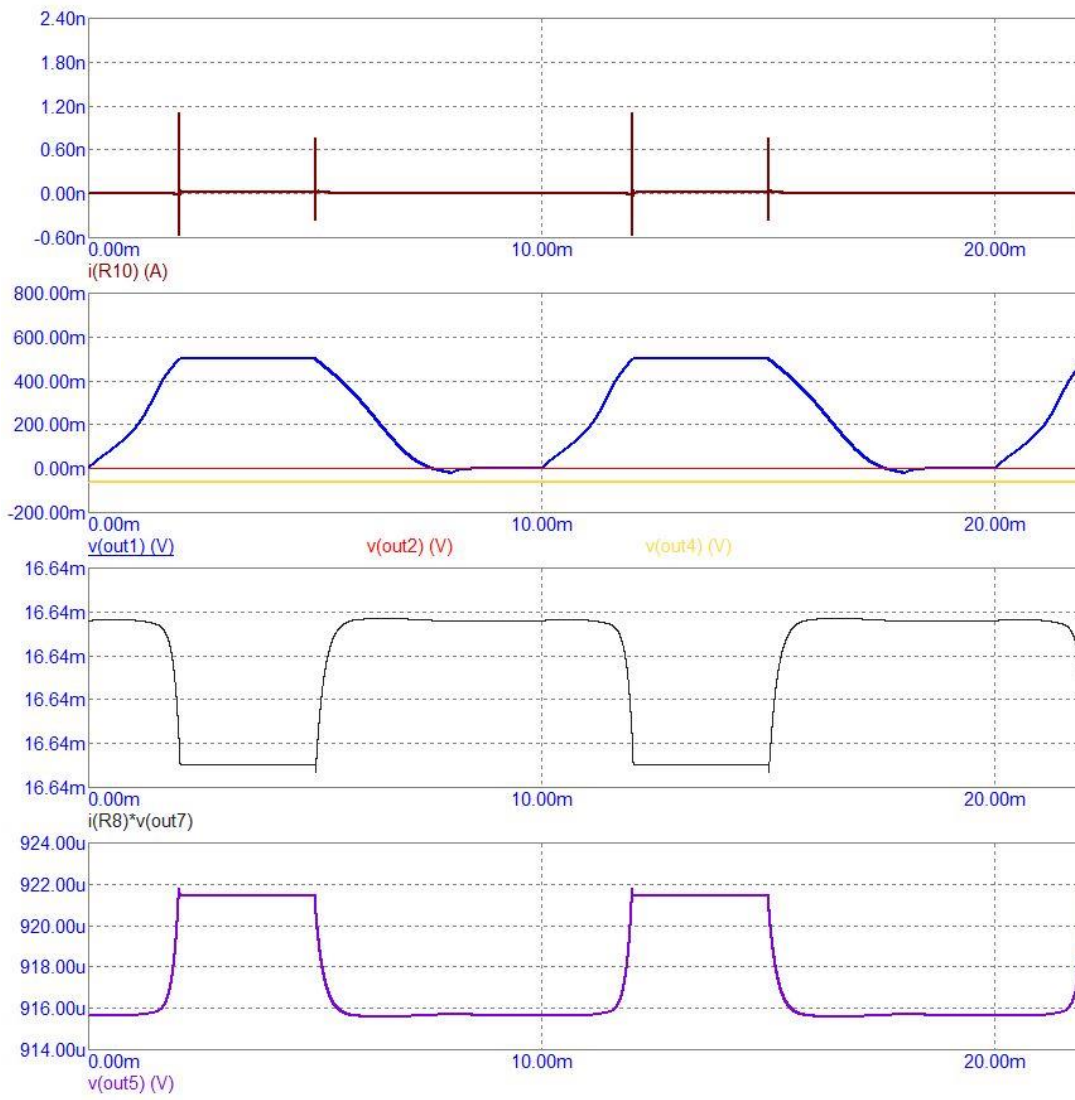
#### **Testy PFC obvodu, zapojení s jedním pravoúhlým zdrojem**

Obvod PFC byl testován s generovaným napětím a jeho časovým průběhem s jedním pravoúhlým zdrojem a to pouze v kladné části napětí, od nuly do kladných hodnot, obr. 65.

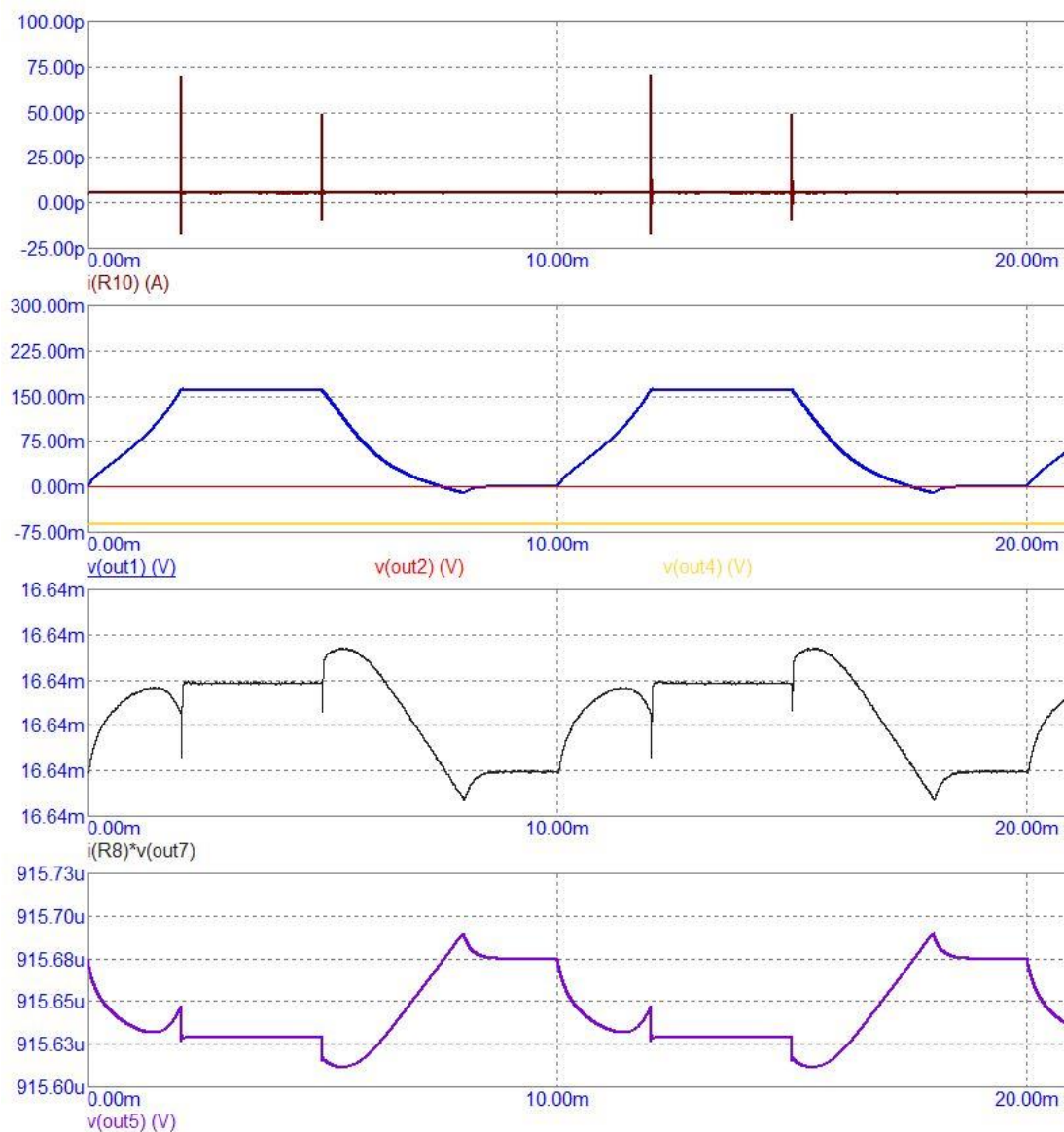




b)



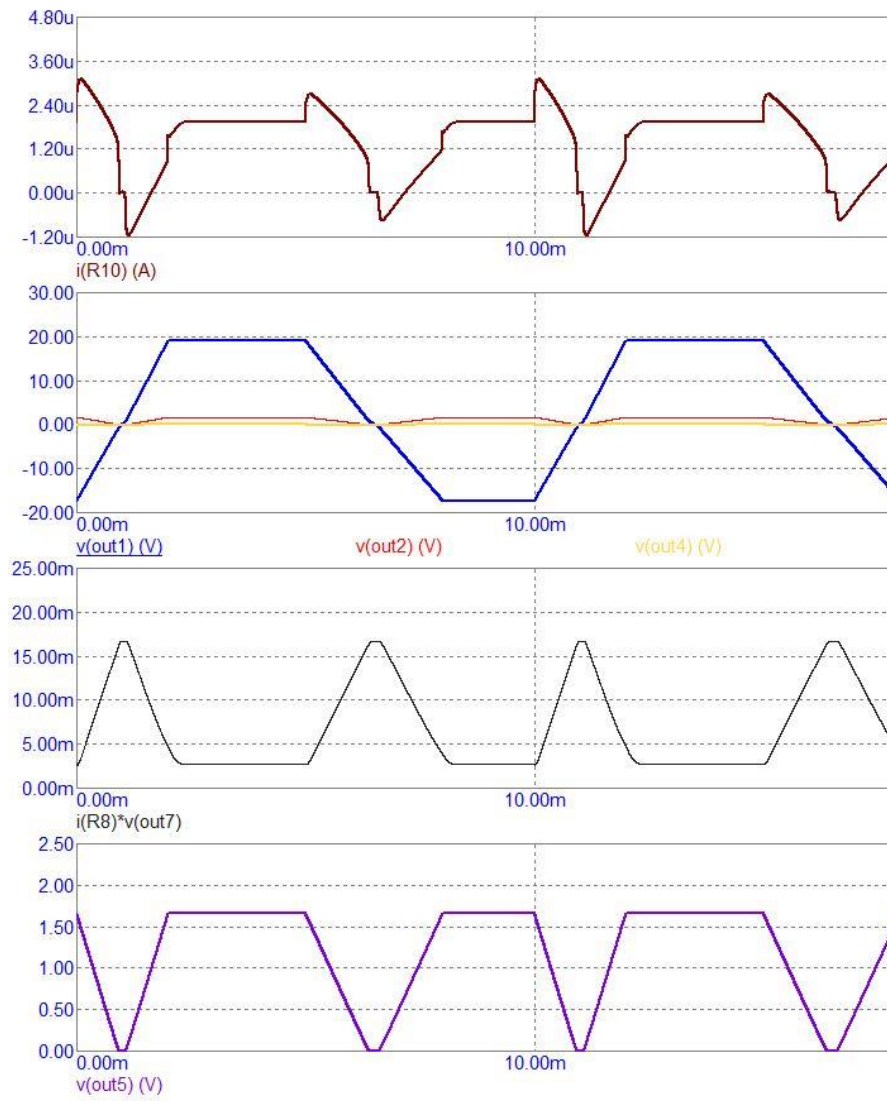
c)



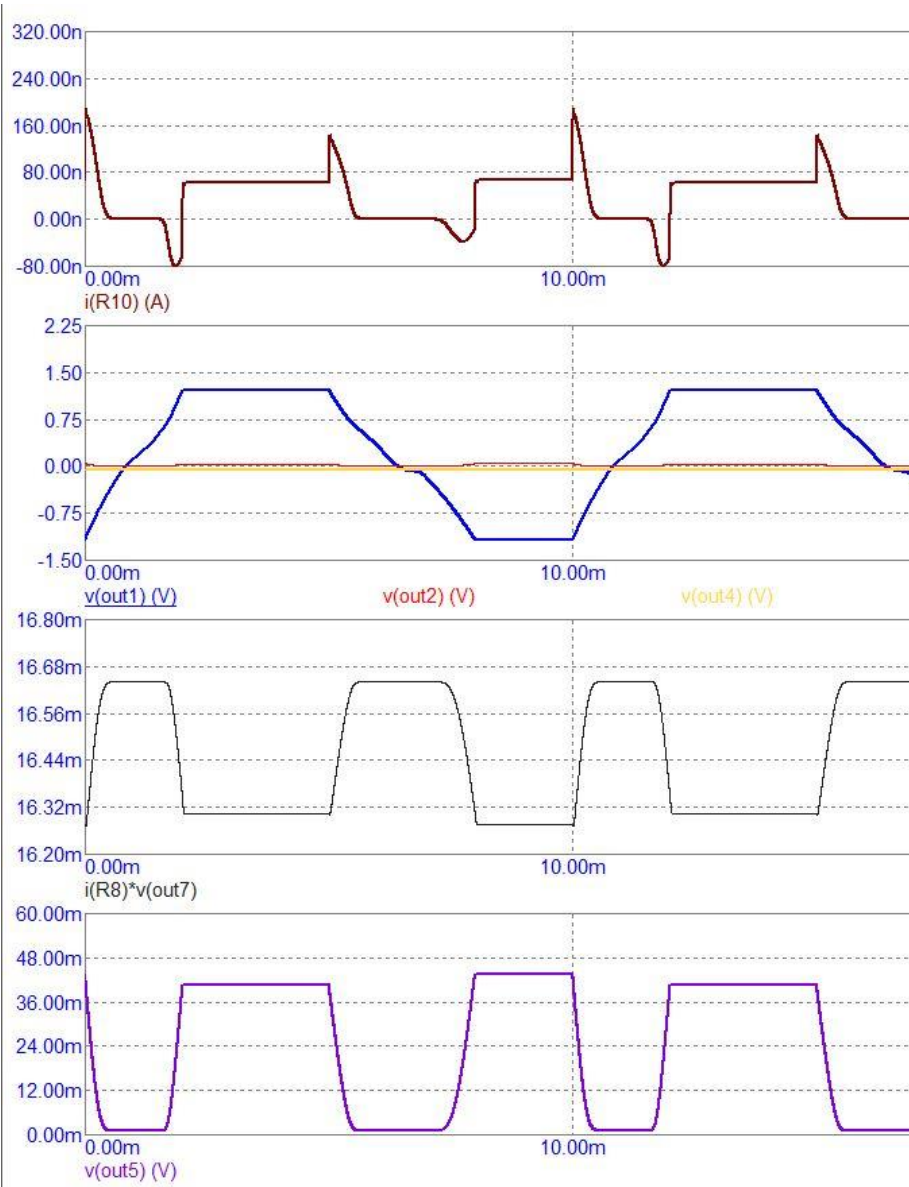
d)

**Obr. 65** Průběhy vyhodnocených veličin PFC modelu v jednotlivých bodech obvodu s jedním pravoúhlým zdrojem při vstupních napětích: a)  $v(\text{out1}) = 40 \text{ V}$ ; b)  $v(\text{out1}) = 2 \text{ V}$ ; c)  $v(\text{out1}) = 1 \text{ V}$ ; d)  $v(\text{out1}) = 0.5 \text{ V}$ .

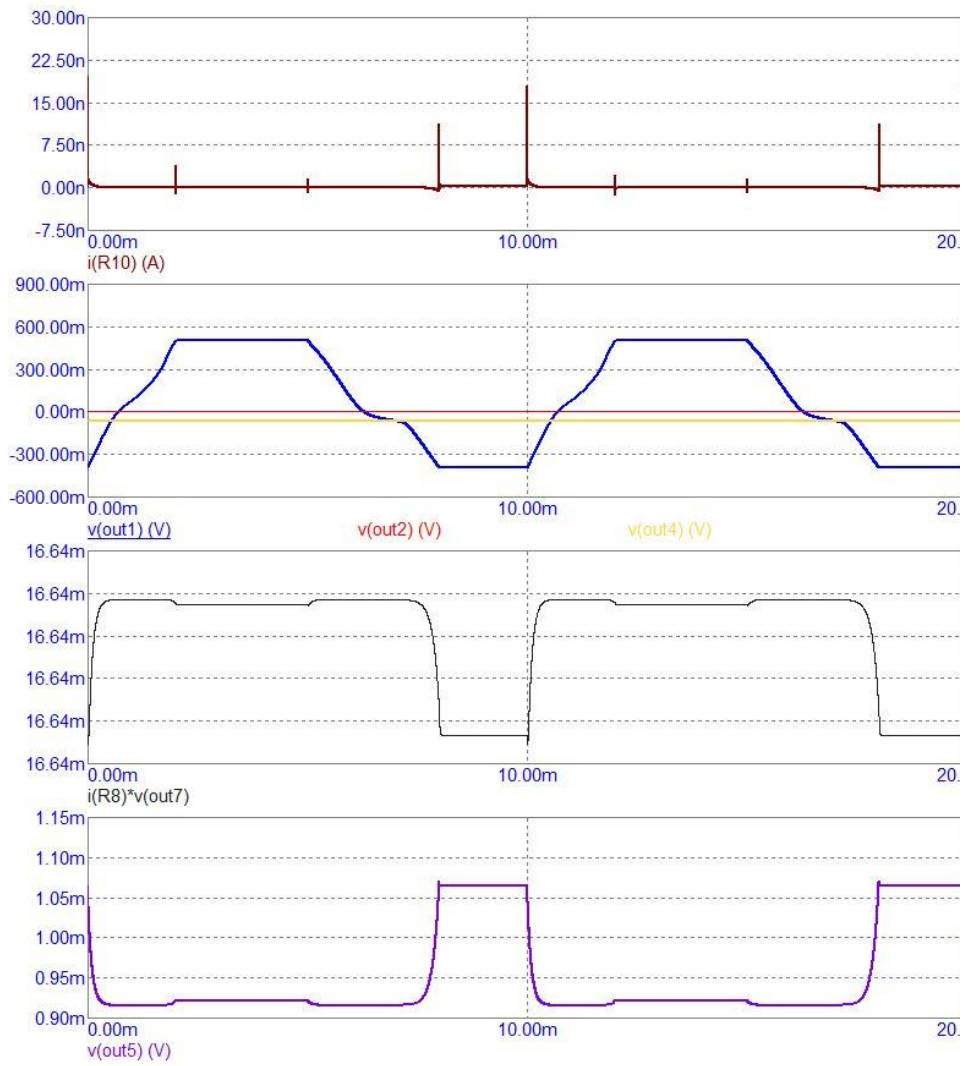
Obdobně byl modelován PFC obvod s jedním pravoúhlým zdrojem signálu v kladné i záporné ose napětí, zobrazení průběhů je na obr. 66.



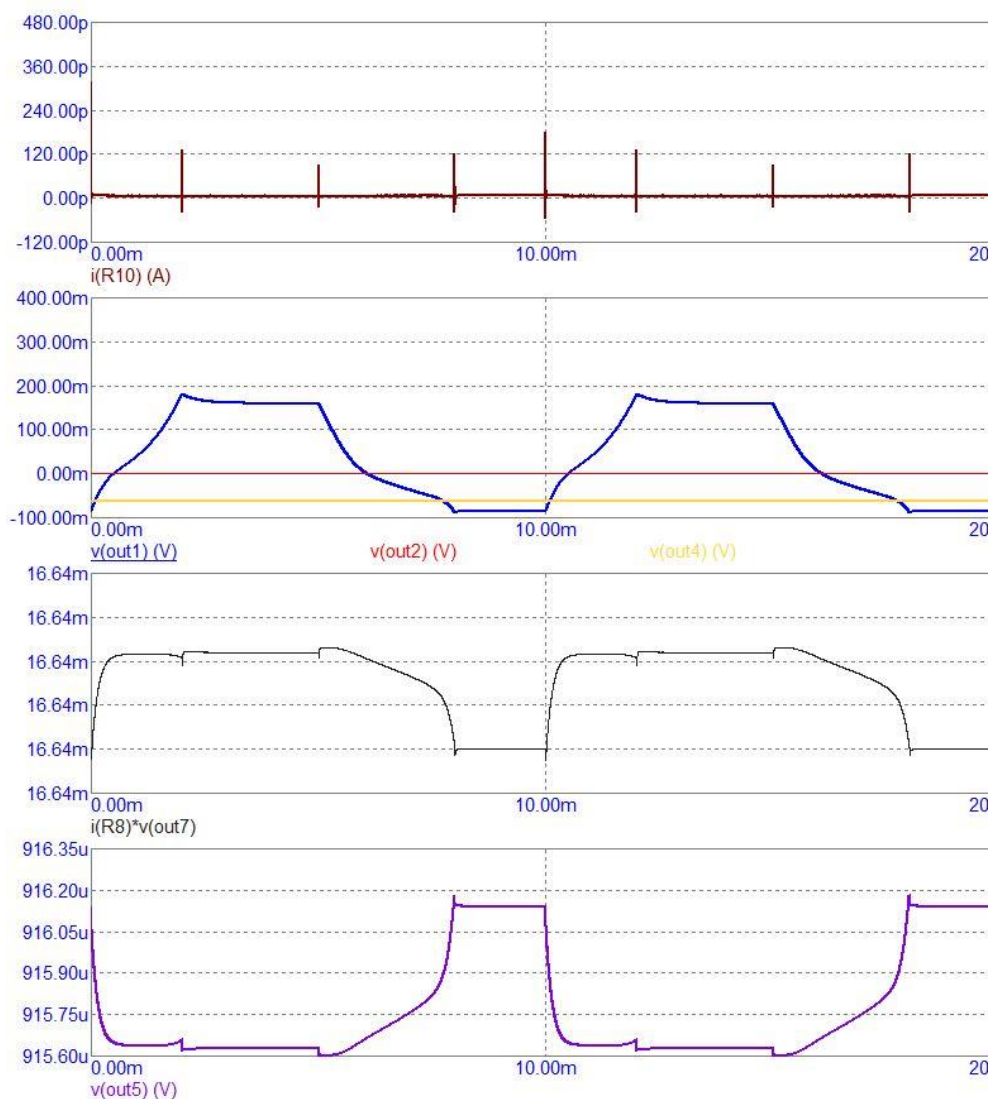
a)



b)



c)

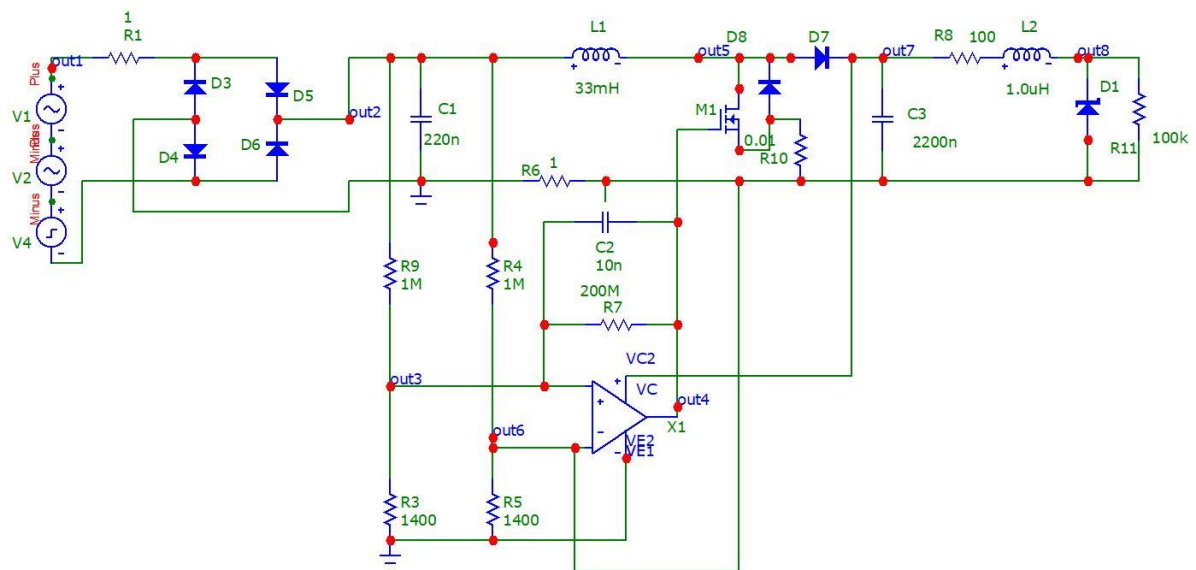


d)

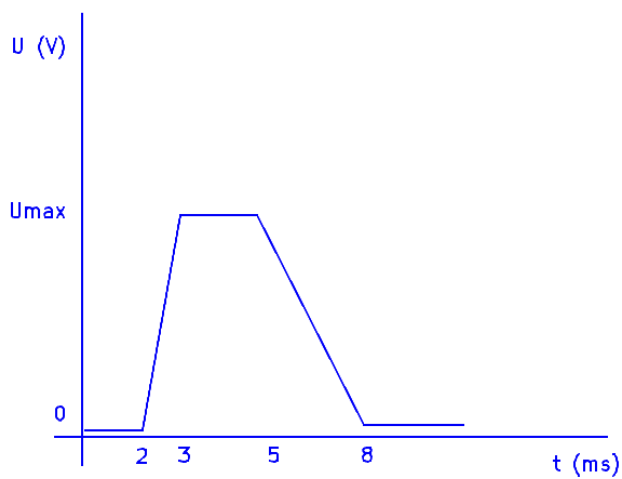
**Obr. 66** Průběhy vyhodnocených veličin PFC modelu v jednotlivých bodech obvodu s jedním pravoúhlým zdrojem při velikostech vstupních napětích: a)  $v(\text{out1}) = 20/-20 \text{ V}$ ; b)  $v(\text{out1}) = 2/-2 \text{ V}$ ; c)  $v(\text{out1}) = 1/-1 \text{ V}$ ; d)  $v(\text{out1}) = 0.5/-0.5 \text{ V}$ .

Dále byl testován případ, který se blíží odhadovaným časovým průběhům veličin generátoru. Proto bylo modelováno **zapojení se dvěma sinusovými a jedním pravoúhlým zdrojem**.

1.  $U_1 = 3.0 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ , harmonický
2.  $U_2 = 1.0 \text{ V}$ ,  $f = 17 \text{ Hz}$ , harmonický
3.  $U_3 = 0.5 \text{ V}$ ,  $t_0 = 0 \text{ ms}$ ,  $t_1 = 2 \text{ ms}$ ,  $t_2 = 3 \text{ ms}$ ,  $t_3 = 5 \text{ ms}$ ,  $t_4 = 8 \text{ ms}$ , pravoúhlý

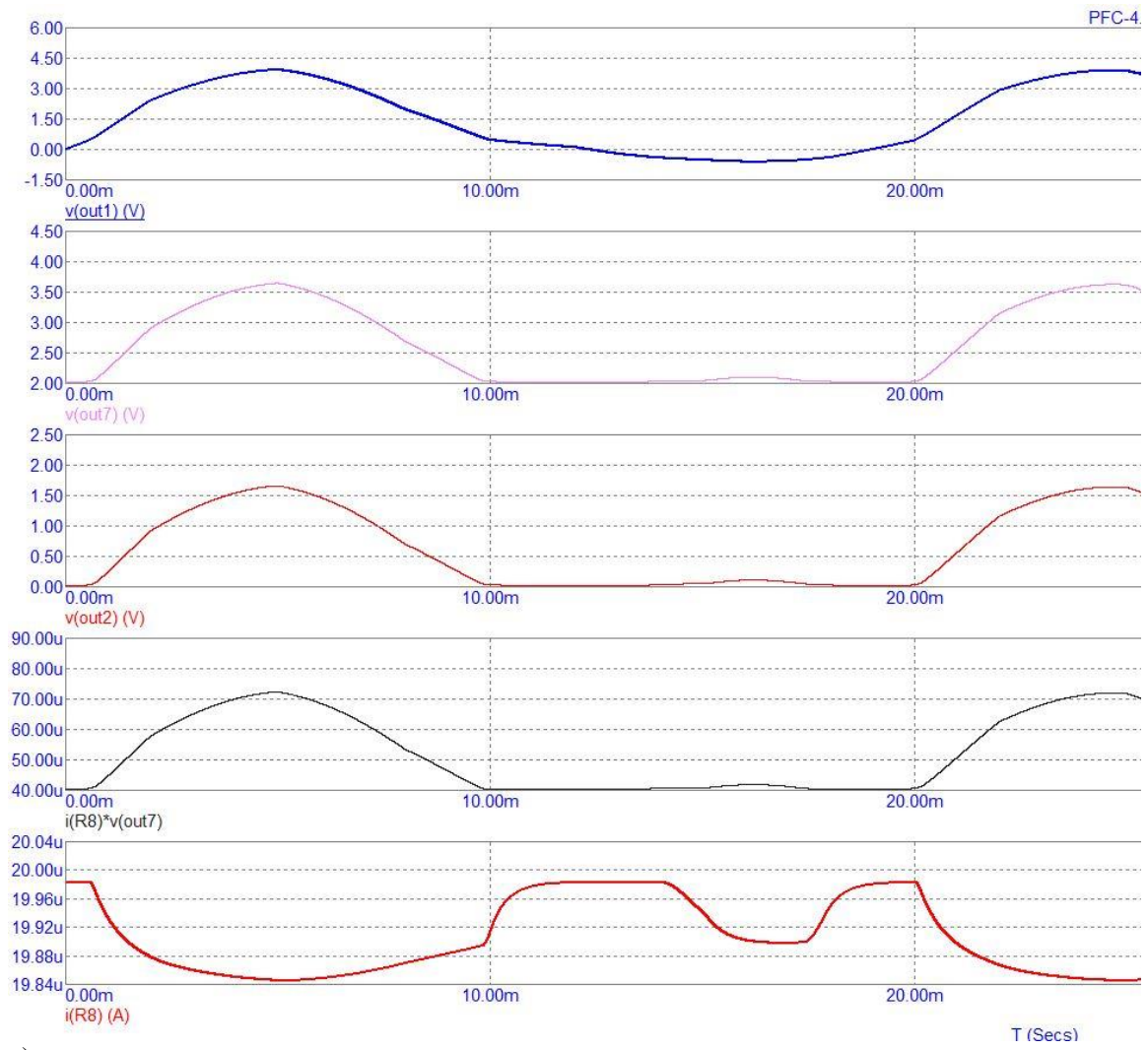


a)

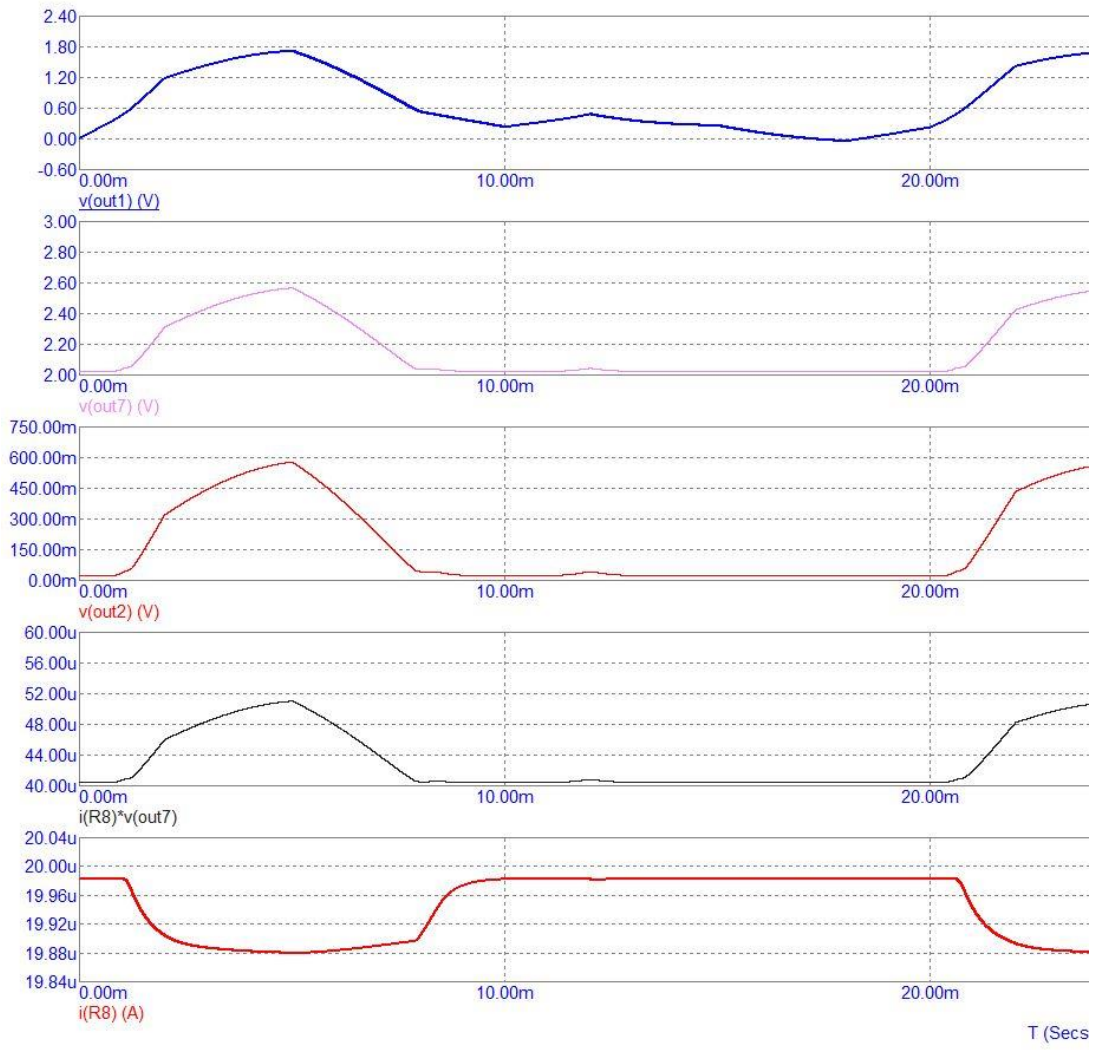


b)

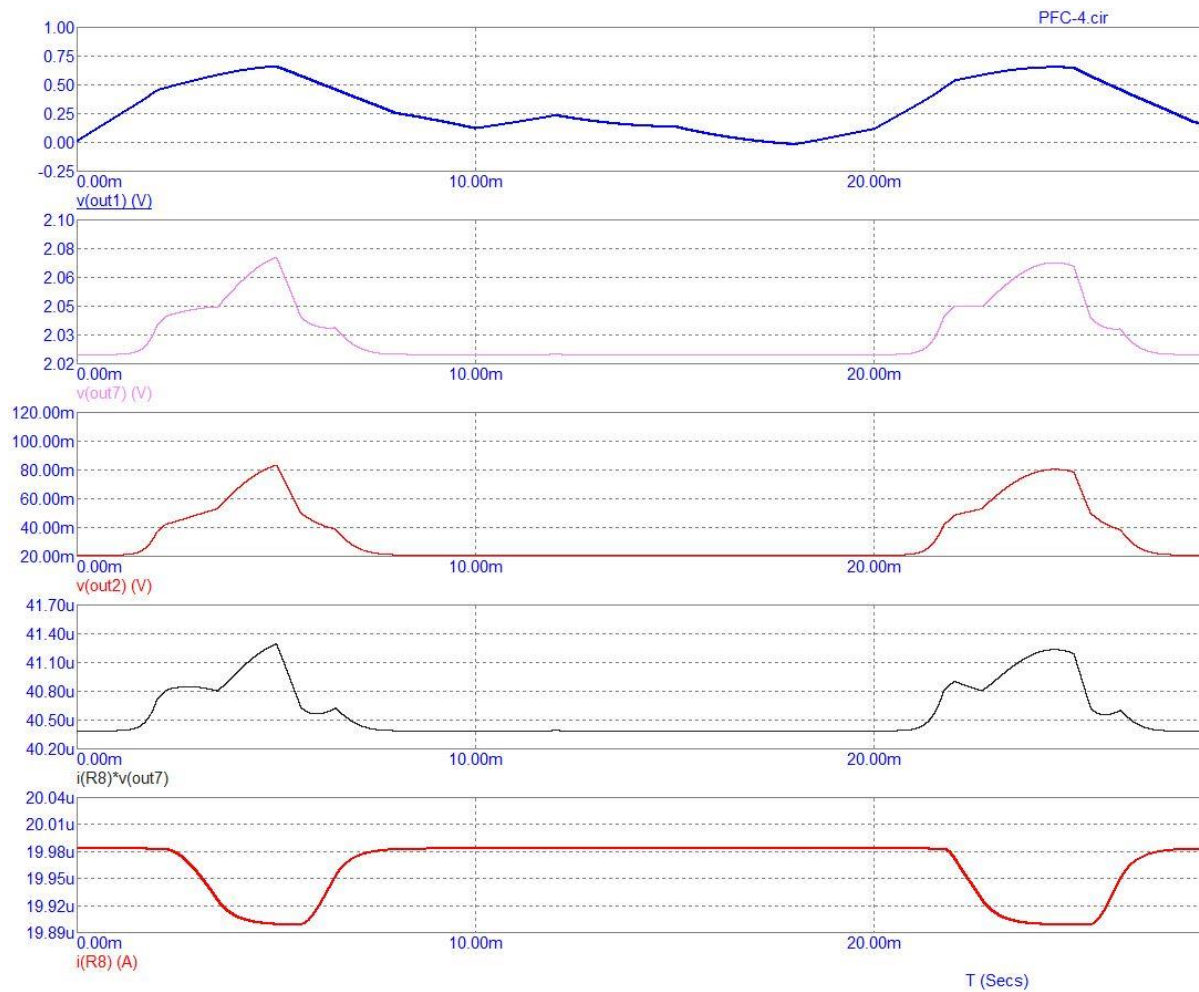
**Obr. 67** Zapojení PFC obvodu: a) se dvěma sinusovými a jedním pravoúhlým zdrojem napětí na vstupu; b) časový průběh zdroje V4.



a)



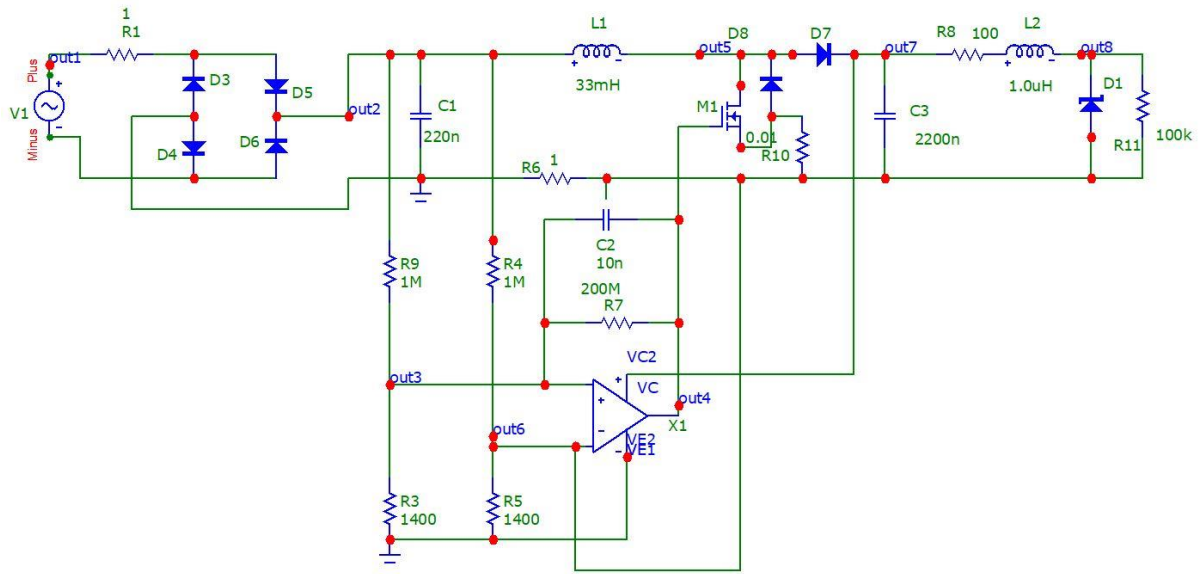
b)



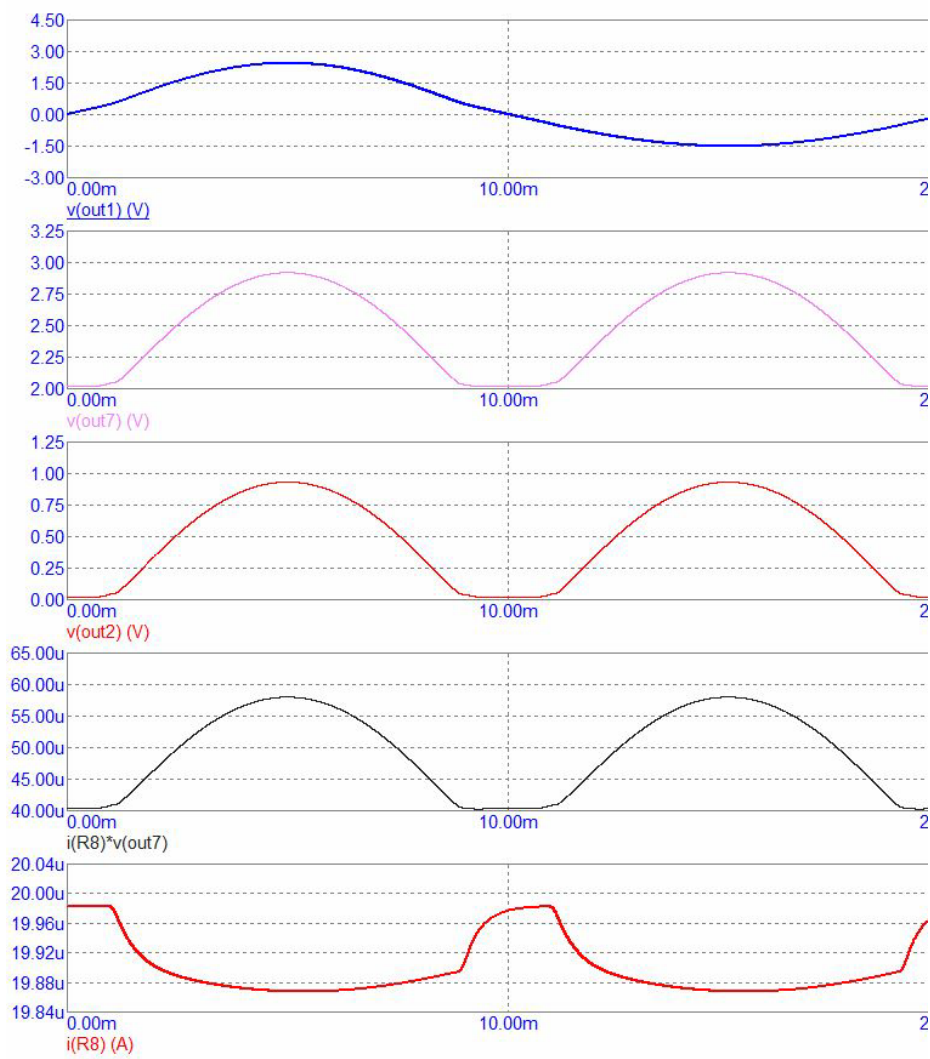
c)

**Obr. 68** Průběhy napětí v jednotlivých bodech obvodu se dvěma sinusovými a jedním pravoúhlým zdrojem signálu na vstupu při různých velikostech vstupních napětích: a)  $v(\text{out1}) = 3.0 \text{ V}$ ; b)  $v(\text{out1}) = 1.0 \text{ V}$ ; c)  $v(\text{out1}) = 0.5 \text{ V}$ .

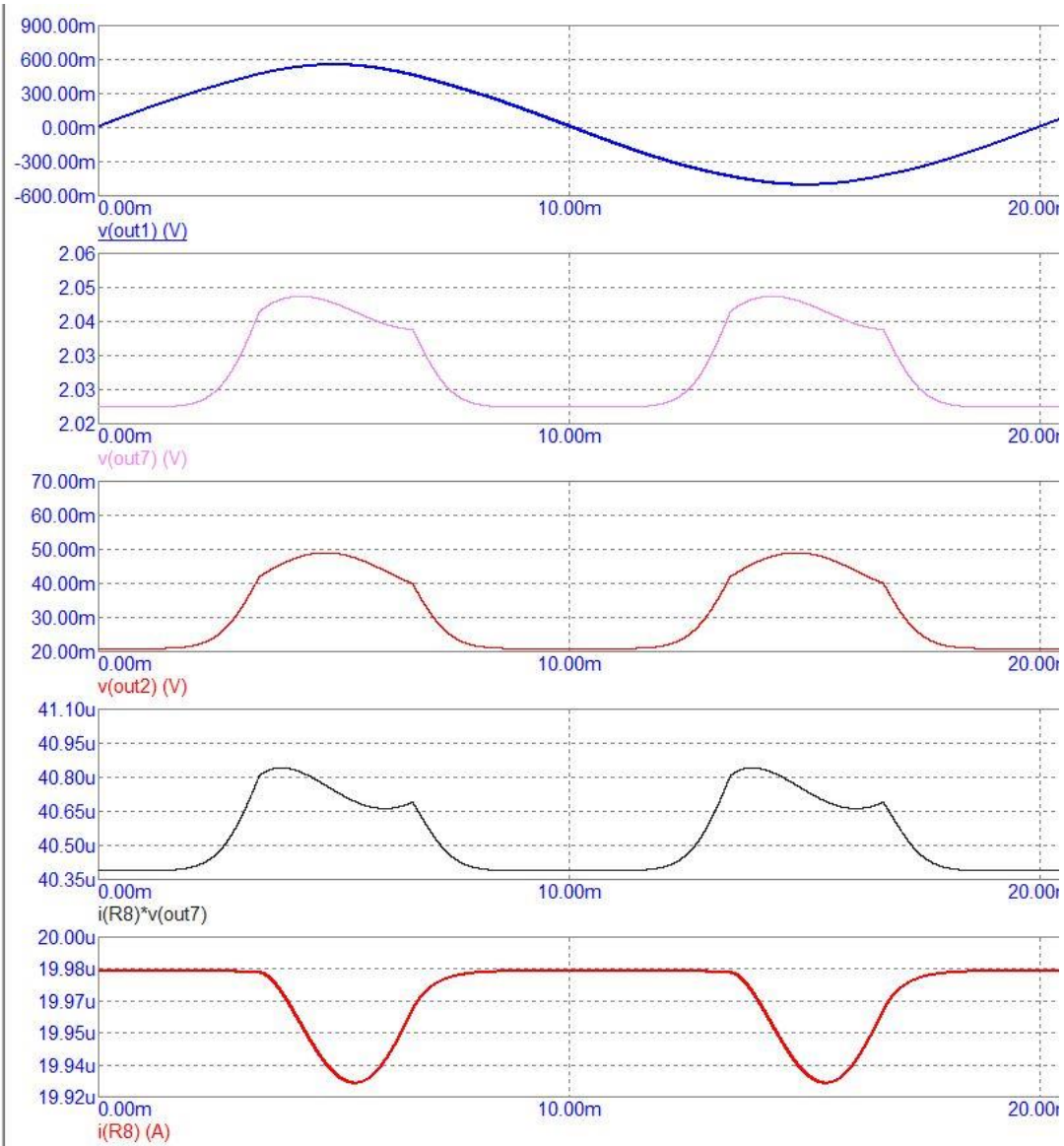
Pro případ optimálního nastavení segmentů generátoru a velikosti napětí byl modelován jednoduchý případ se **zapojení s jedním sinusovým zdrojem napětí**, obr. 69.



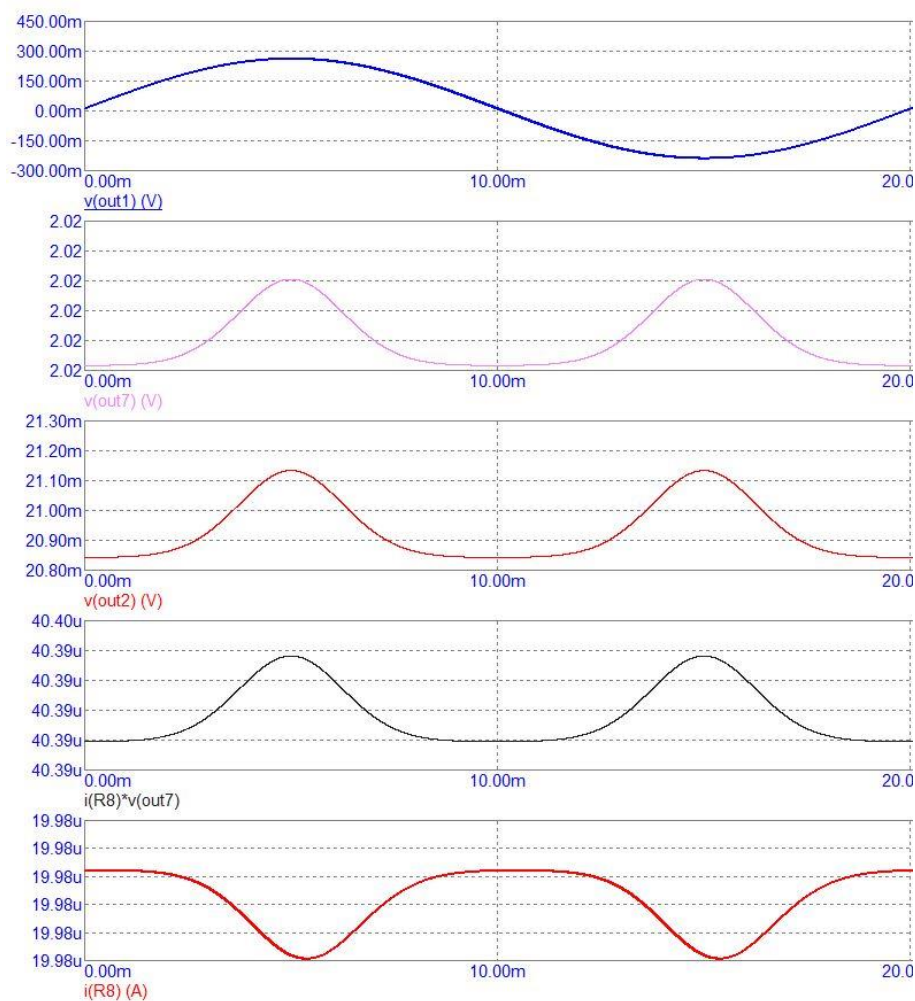
**Obr. 69** Zapojení PFC obvodu s jedním sinusovým zdrojem napětí na vstupu.



a)

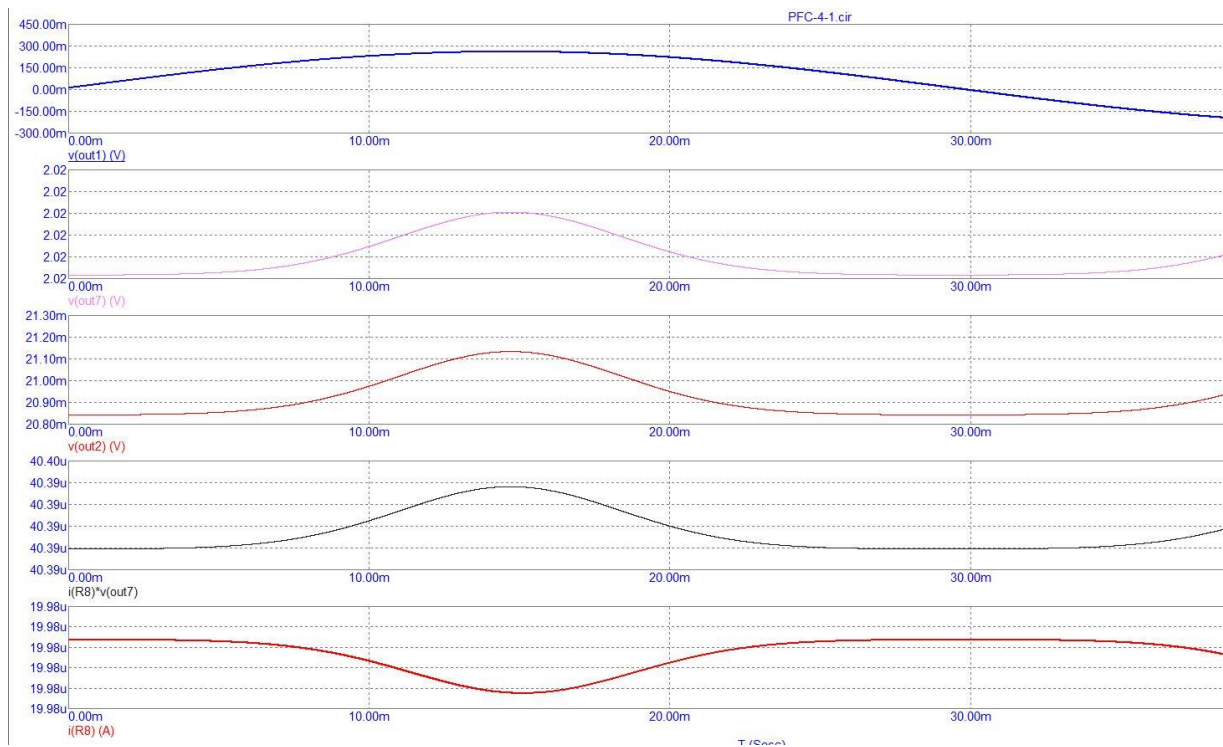


b)



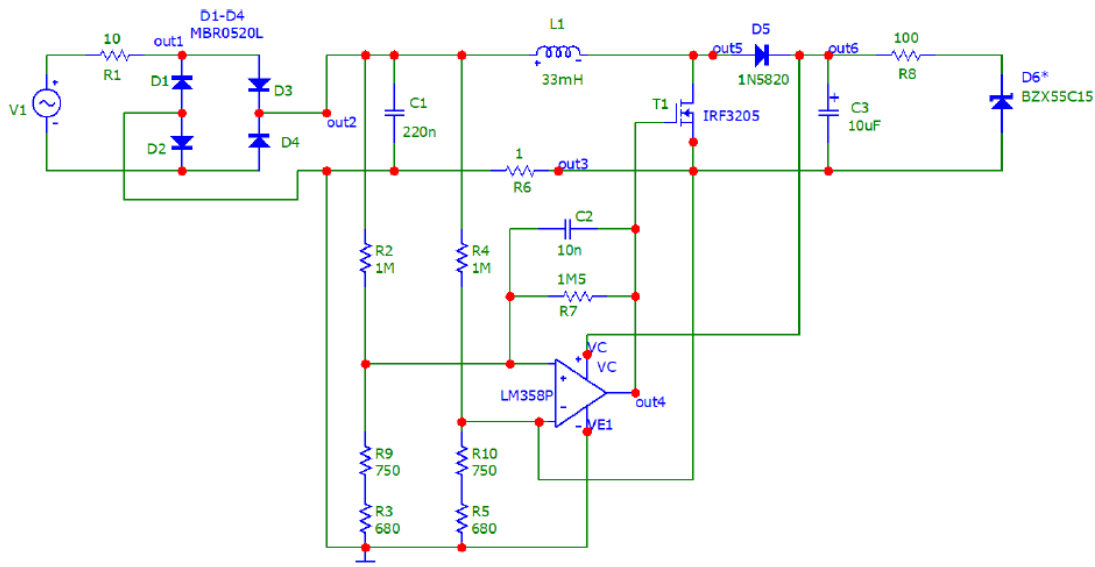
c)

**Obr. 70** Průběhy veličin v jednotlivých bodech obvodu se jdením sinusovým zdrojem napájecího napětí při různých vstupních úrovních napětích a kmitočtu  $f = 50$  Hz: a)  $v(\text{out1}) = 3.0$  V; b)  $v(\text{out1}) = 1.0$  V; c)  $v(\text{out1}) = 0.5$  V.



**Obr. 71** Průběhy okamžitých hodnot veličin v jednotlivých bodech obvodu se sinusovým zdrojem napětí na vstupu pro napětí s kmitočtem  $f = 17 \text{ Hz}$ ,  $v(\text{out1}) = 0.5 \text{ V}$ .

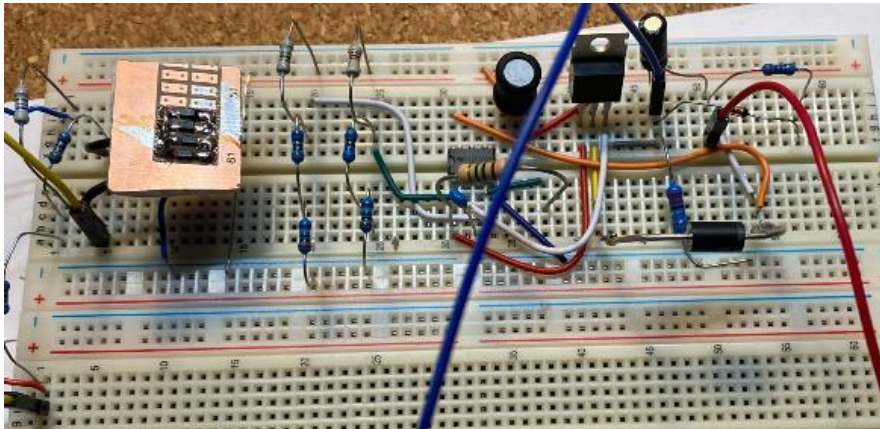
Numerické modely a jejich simulace sloužily k rychlému teoretickému náhledu na očekávané průběhy veličin v obvodu PFC. Z těchto závěrů se pak formuloval návrh obvodu realizovaný na PCB a osazený pro další experimentální ověření a testy. Pro prověření funkčnosti PFC obvodu, obr. 72, byl PFC obvod sestaven na nepájivém poli obr. 73. Jeho schéma zapojení na nepájivém poli je na obr. 72. Jako vstupní průběh bylo použito funkce sinus pro napětí s frekvencí  $f = 50 \text{ Hz}$  o velikosti  $U_{ef} = 8.0 \text{ V}$ .



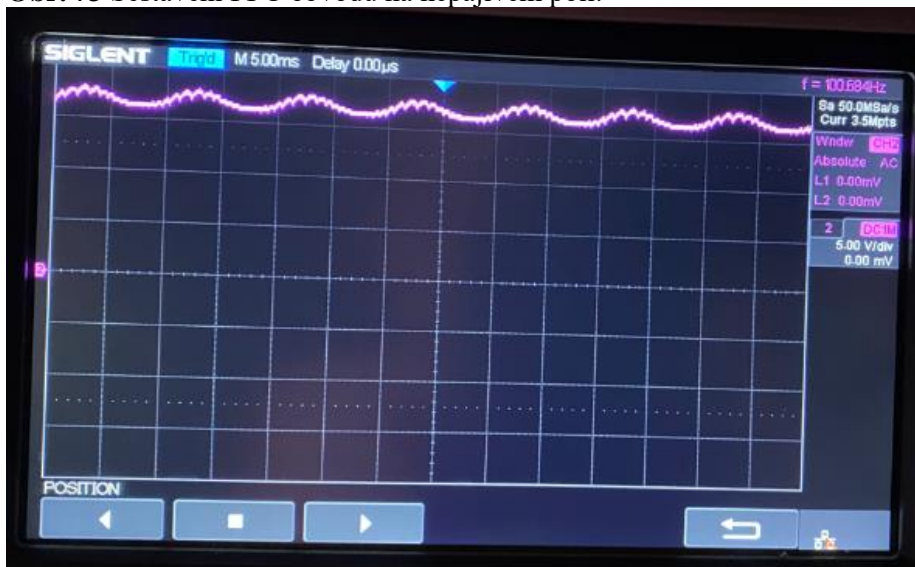
**Obr. 72** Schéma PFC obvodu experimentálně sestaveného na nepájivém poli.

Experimentem bylo ověřováno jak funkčnost zapojení, tak stavy při různých parametrech jeho nastavení. Tyto stavy se volily s ohledem na očekávané parametry segmentů generátoru. Výstupní napětí obvodu PFC  $u_{\text{out}}(t)$  bylo měřeno v bodě „out6“ podle schématu na obr. 72. Časový průběh výstupního

napětí  $u_{out}(t)$  je zobrazen na obr. 74. V obvodu podle obr. 72 pak rezistor  $R8 = 100 \Omega$  a Zenerova dioda D6 se zenerovým napětím 15 V pracuje jako napěťový stabilizátor. Jak již bylo dříve v textu popsáno několik způsobů PFC obvodů, lze u navrženého schéma jednoduše popsat jeho funkci. Vstupní střídavá napětí se usměrní můstkovým usměrňovačem. Je připojeno na filtrační kondenzátor a dále do série řazené indukčnosti  $L_1$ , která akumuluje energii (tzv. boost režim). Toto pulzující napětí je pak spínáno MOSFET tranzistorem  $T_1$ . Spínání je řízeno operačním zesilovačem nastaveným pomocí děliče napětí na vstupu. Kondenzátor  $C_3$  zajišťuje akumulaci, napěťový dělič R8 s D6 zajišťuje max výstupní napětí  $U_{max} = 15$  V. Takto dosáhneme vyšší úrovně výstupního napětí vzhledem k amplitudě vstupního napětí. Odebíraný proud má téměř časově neposunutý průběh a tím se zaručuje maximální využití odebraného činného výkonu. Při odfiltrování stejnosměrné složky dostaneme detail průběhu výstupu obvodu, jak je zobrazeno na obr. 75.



**Obr. 73** Sestavení PFC obvodu na nepájivém poli.



**Obr. 74** Průběh napětí v bodě „out6“ PFC obvodu podle schématu obr. 72.

Po ověření funkčnosti PFC obvodu na nepájivém poli byl proveden návrh v prostředí KiCad 8.0 návrh desky a její následná výroba. Schéma bylo převzato podle odzkoušeného zapojení obr. 72. Byly doplněny piny pro měření na desce, obr. 77b. Na horní straně plošného spoje (obr. 77b) jsou převážně použité SMD součástky s několika THT součástkami jako cívka, vyhlazovací kondenzátor na výstupu a usměrňovací Schottkyho dioda. Spodní strana plošného spoje (obr. 78) obsahuje operační zesilovač a spínací MOSFET tranzistor, který je přes tepelně vodivou pastu spojen s větší plochou mědi pro účinné chlazení.

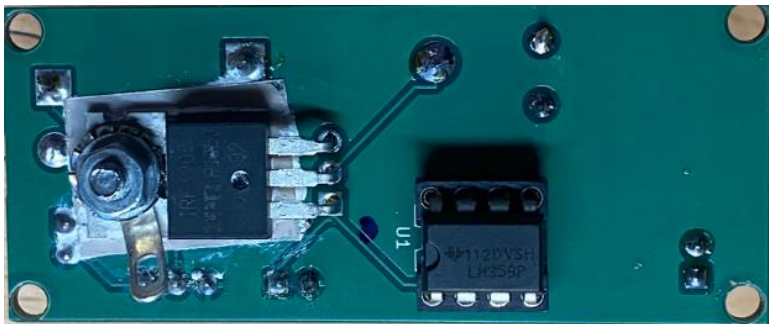






b)

**Obr. 77** Návrh DPS PFC obvodu: a) model KiCad; b) realizace a osazení horní strany.



**Obr. 78** Spodní strana plošného spoje s OZ a MOSFET tranzistorem.

### Diskuze experimentální části a ověření parametrů segmentového generátoru a elektroniky řízení výkonu.

V experimentální části byly ověřeny teoreticky předpokládané parametry generátoru, jak byly již také publikovány [25], [32]. Předpokladem bylo stanovení navýšení násobného zvýšení výstupního elektrického napětí na svorkách vinutí segmentu (2500 násobek) vzhledem k dosud používaným koncepcím uspořádání magnetického obvodu [25], [32].

Experiment potvrdil možnost superpozice okamžitých hodnot napětí  $u_{L1}(t)$ ,  $u_{L2}(t)$ ,  $u_{L3}(t)$  cívek  $L1$ , ...,  $L3$  vinutí segmentu.

Experiment ukázal na parametry výroby, které mohou snižovat výtěžnost generátoru. Jak bylo popsáno jedná se zejména o tolerance nastavení, výroby uspořádání segmentů v bloku generátoru. Může docházet k časovým posunům okamžitých hodnot mezi výstupními napětími segmentů dále řazených do série. Dále nastavení vzduchové mezery a magnetického obvodu pohyblivé a statické části může ovlivnit velikost maximálního napětí na výstupu segmentu v generátoru.

Experiment prověřil možnosti optimalizace výkonu segmentů pomocí usměrnění výstupního napětí a odstranění tak časových posunů okamžitých hodnot napětí výstupu segmentů. Dále ukázal na parametr velikosti požadovaného výstupního napětí a použitelnost navržených metod usměrnění výstupního napětí segmentu.

Experiment prověřil jedno ze zapojení PFC obvodu pro řízení maximálního výkonu na výstupu generátoru bez ohledu na charakter připojené elektrické zátěže.

Obvod byl numericky modelován pro očekávané tvary okamžitého napětí výstupu segmentu generátoru. Varianty byly analyzovány a vyhodnoceny.

Navržený obvod byl otestován na nepájivém poli a byly ověřovány jeho parametry. Na základě nalezení zobecněného schématu byla navržena PCB deska a osazena. Byla také experimentem ověřena.

Tato experimentální část ověřila teoretické a numerickými modely ověřené parametry. Ukazuje, že koncepty a návrhy generátoru jsou pro jeho reálné využití vhodné.

## 8. Přínos a novost práce

Výzkum v oblasti alternativních zdrojů se odráží o širší povědomí současného stavu a vlastní publikační činnost. Byl nalezen nový, dříve nepublikovaný způsob uložení a zapojení magnetického obvodu lineárního generátoru, který je popsán v kapitole 4. Jako doprovodný nástroj byl navržen sdružený numerický model, založený na metodě konečných prvků (MKP), kapitola 5. Na základě sestaveného numerického modelu MKP byla provedena analýza a část generátoru s magnetickým obvodem byla testována a experimentálně ověřována. Na základě analýzy byla navržena nová koncepce a konstrukce změny uzavírání magnetického toku. Bylo navrženo několik vhodných řešení, ze kterých je možné vycházet při optimalizaci dané koncepce a konstrukce. Tyto koncepce byly opublikovány a přinášení nová konstrukční a teoretická řešení dříve neuveřejněná.

Navržené koncepce a možné konstrukční uspořádání, z nichž některá byla testována a výsledky publikovány, vychází z důsledného aplikování Faradayova indukčního zákona a výsledků numerické analýzy MKP. Jak je uvedeno v publikacích týmu UTEE, některé konstrukce se významně odlišují od současných návrhů obdobných harvestorů a to tím, že mají vysokou efektivitu přeměny pohybové energie na elektrický výkon ( $p_{\text{efd}}$ ), jak je patrné například z tabulky tab.1, typ MGI 2006.

Nově navržené principy koncepce jsou uvedeny v kapitole 4 a zobrazeny na obrázcích obr. 14, obr. 15, obr. 16 a obr. 17. Tyto koncepce jsou technicky proveditelné. Vycházejí z předchozích zkušeností testovaných a publikovaných návrhů harvestorů.

Jádro disertační práce bylo průběžně publikováno a je rozvedeno zejména v pracích [25–28], [32], [41]. Nejlepší koncepční a konstrukční návrh uspořádání elektromagnetického obvodu harvestoru dosáhl 2500 násobku zvýšení maximálního napětí na vinutí cívek v porovnání s dosud známým uspořádáním a to běžně ve světě využívaným.

Cílem návrhu harvestorů a elektrických generátorů je získat vysoký výkon z malého objemu zařízení, vysokou efektivitu transformace energie, konstrukční a technologickou dosažitelnost. Například tato zařízení jsou dále aplikovatelná v dopravě – automobily, letectví atp. [26], [32], [41].

Na základě experimentů a analýz numerických modelů jak MKP, tak metodami soustředěných parametrů byl navržen a zkoumán koncept elektroniky řízení optima přenosu výkonu z harvestoru do proměnné elektrické zátěže. Byly otestovány konstrukce a koncepce obvodů řízení výkonu založené na PFC obvodech. Z několika modelů a experimentálních ověření byly shrnuty závěry v kapitole 7. Celý přístup byl zaměřen na aplikaci pro mnohasegmentové uspořádání základních transformačních prvků energie s cílem efektivního přenosu výkonu do elektrické zátěže a technická dosažitelnost řešení.

Dosud byly pro návrh lineárního generátoru nebo robustního harvestoru s pohonem lineárního motoru používána uspořádání, která vycházela z koncepce lineárního elektrického motoru [50–82], [108]–[127]. U nich nebyly brány v potaz jak zákonitosti dosažení maximální transformace pohybové energie na elektromagnetickou, pomocí Faradayova indukčního zákona, obr. 16, (3). Předložená práce přináší ve svém jádru řešení, která spočívají v detailním nastavení magnetického obvodu s maximálním efektem rychlé změny magnetického toku za jednotku času, obr. 17b. Dále úspěch nové koncepce také podpoří zvládnutí problematiky efektivního způsobu vinutí cívky generátoru, obr. 19c. Nové je také navržené řešení pro zvýšenou efektivitu a dosažení vysoké výtěžnosti přechodem z jednočinného na dvoučinný koncept uspořádání magnetického obvodu generátoru, obr. 20g a obr. 20h.

Tyto výše popsané nové přínosy poznatky byly řádně opublikovány [17], [25–28], [31–32], [41].

## 9. Závěr

Dosavadní výzkum v oblasti alternativních zdrojů elektrické energie bodově shrnutý a uvedený v textu úvodu předložené práce, na základě zhodnocení současného stavu řešení ve světě a na pracovišti UTEE, našel nové směry teoretické elektrotechniky v oblasti robustního harvestingu, generování elektrické energie s výkonem do  $P = 10$  kW.

Byly nalezeny zcela a dříve nepublikované nové koncepční přístupy v oblasti návrhu magnetického obvodu uspořádání lineárního posuvného (transformačního) generátoru s ohledem na dosažený zdvih posuvu. Toho bylo dosaženo na základě racionálních rozborů dynamického modelu systému spřaženého lineárního pohonu a harvestoru, byl popsán nový směr z oblasti koncepce, konstrukce a provedení elektromagnetického generátoru lineárního uspořádání. Byla rozvinuta a použita metodika návrhu magnetického obvodu podpořena numerickým modelováním a následný návrh uspořádání, která vede k efektivnímu využití transformace pohybové energie na elektrickou. Je uvedena v kapitole 4.

Doktorská disertační práce přináší rozvinutí teoretického návrhu, popisu a detailů koncepce podpořené modelováním metodou konečných prvků (MKP) a dále metodami se soustředěnými parametry (obvodové modely). Byl porovnán jak teoretický tak experimentální vzorek vícesegmentového modelu generátoru s hodnocením kvalitativních a kvantitativních parametrů navrženého řešení se sledováním klíčového parametru dosažené objemové hustoty výkonu, kapitola 5-7.

Podářilo se nachystat zkušební vzorky pohybového mechanismu, motory jak spalovací, tak expanzní poháněné stlačeným plynem CO<sub>2</sub>. Na modelovém malém vzorku s malým výkonem byl ověřen numerický model a jeho výstupy analýzy MKP i experimentálně dosažitelný výkon transformace a další parametry návrhu. Byla ověřována funkčnost návrhů magnetických uspořádání, optimalizace výkonu a návrh obvodů řízení výkonu.

Takto popsaný generátor je vhodný pro modifikaci na velký transformovaný výkon výstupního generátoru s pohonem například vysoce efektivní spalovací lineární jednotkou. Všechny zásadní části a novosti práce byly publikovány v časopisech a fórech světových konferencí.

Stanovené cíle disertace byly splněny a zásadní části byly opublikovány. Výzkum a popsané výstupy disertační práce splnily nalezení novosti v několika oblastech.

1. Navržení koncepce vysoceefektivního přenosu energie,
2. Navržení velmi účinného uspořádání magnetického obvodu mnohasegmentového generátoru,
3. Navržení a otestování spojení lineárního uspořádání vícesegmentového efektivního generátoru s malým zdvihem pohyblivé části.

Splnění cíle bylo dosaženo, kapitola 3, tak, že byla navržena specifická (dříve nepublikovaná) koncepce konstrukčně proveditelného lineárního elektrického generátoru pro vysokou účinnost přeměny elektromechanického lineárního generátoru (s vysokou objemovou hustotou výkonu  $p_{efd}$ ).

Byl navržen a úspěšně testován koncept spojení efektivní pohonné jednotky lineárního pohonu a lineárního elektrického generátoru, která tvoří mechanický lineární pohyb. Byla nalezena a popsána řešení pro dosažení maximální účinnosti převodu energie, která výrazně přesahují doposud používané a publikované generátory obdobné koncepce.

Na základě teoreticky formulovaného modelu dynamického systému byl zpracován návrh a na funkčním vzorku experimentem ověřen a parametricky testován koncept generátoru/harvestoru pro vyšší přenos výkonu.

Byla navržena, realizována a testována elektronická jednotka pro optimalizaci okamžitého přenosu výkonu mnohasegmentového provedení generátoru.

Výzkum a aplikace předložené práce je využitelný například v dopravě, jak bylo publikováno v práci [32] a [41].

## Literatura

- [1] BENTHAUS, M. A coupled technological-sociological model for national electrical energy supply systems including sustainability. *Energy, Sustainability and Society*, 2019, 9(1), 50.
- [2] MUDALIAR, S. M. a SOMAN, A. R. Electrical power generation harnessing human energy and its analysis. In: 2015 International Conference on Energy Systems and Applications. 2015, s. 333–337. IEEE.
- [3] BENTHAUS, M. a GOSPER, L. National electrical energy supply: foundations of a future system. *Energy, Sustainability and Society*, 2023, 13(1), 41.

- [4] DEBNATH, K. a GOEL, L. Power system planning—a reliability perspective. *Electric Power Systems Research*, 1995, 34(3), 179–185.
- [5] KAPLAN, G. Power/energy: I. Efficient devices/systems: Utilities explore new means to cut energy losses during transmission and distribution. *IEEE Spectrum*, 1981, 18(1), 74–77.
- [6] TRIEZENBERG, D. M. An efficient state variable transmission line model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1979, (2), 484–492.
- [7] TAM, K. S. Assessment and enhancement of the utilization of electric power transmission lines. In: *Proceedings of SOUTHEASTCON'96*. 1996, s. 618–625. IEEE.
- [8] CAEAZZA, J. A., SCHNEIDER, T. R. a SULZBERGER, V. T. Power: Energy on call: A more efficient peaking system would exploit the advantages of energy storage, while conserving capital and resources. *IEEE Spectrum*, 1976, 13(6), 45–48.
- [9] SMITH, S. C., SEN, P. K., KROPOSKI, B. a MALMEDAL, K. Renewable energy and energy storage systems in rural electrical power systems: Issues, challenges and application guidelines. In: *2010 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC)*. 2010, s. B4–B4. IEEE.
- [10] GU, H. Maximum instantaneous renewable energy integration of power grids. In: *2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. 2016, s. 1–5. IEEE.
- [11] WANG, X., GUERRERO, J. M., CHEN, Z. a BLAABJERG, F. Distributed energy resources in grid interactive AC microgrids. In: *The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*. 2010, s. 806–812. IEEE.
- [12] CHERNYAEV, A., MAKARCHYAN, V. a ANDRYUSHIN, A. Combined heat and power plants load distribution optimization. In: *45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010*. 2010, s. 1–4. IEEE.
- [13] MOKHTARI, H. a SARAJIAN, A. Interaction of combined cycle power plant (CCPP) and power system at two levels of performance optimization. In: *2014 5th Conference on Thermal Power Plants (CTPP)*. 2014, s. 1–6. IEEE.
- [14] RAJALA, P. Compact Power Plants as an Economical and Reliable Standby Power Supply. In: *TELESCON'94 – The First International Telecommunications Energy Special Conference*. 1994, s. 67–74. IEEE.
- [15] BUSKMILLER, M. R. a ELGIN, J. B. Architecture of a compact battery plant system designed for the diverse customer premise market. In: *Fourteenth International Telecommunications Energy Conference – INTELEC'92*. 1992, s. 365–370. IEEE.
- [16] GRIGORASH, O., TROPIN, V. a BARYSHEV, P. Mobile Compact Solar Power Plant for Small Farms. In: *2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. 2023, s. 146–151. IEEE.
- [17] FIALA, P., SZABÓ, Z., MARCOŇ, P. a ROUBAL, Z. Mini- and microgenerators applicable in the MEMS technology. *Proc. SPIE*, 2017, vol. 10246. DOI: 10.1117/12.2263747.
- [18] AMROUCHE, S. O., REKIOUA, D., REKIOUA, T. a BACHA, S. Overview of energy storage in renewable energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(45), 20914–20927.
- [19] LIU, L., MA, Y., LI, Y., PENG, Y., HE, R. a LI, Y. Review of Gravity Energy Storage Research and Development. In: *2023 8th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*. 2023, s. 395–399. IEEE.
- [20] LI, P., HAN, P., LIU, S. a ZHANG, J. Capacity coordinated optimization of battery, thermal and hydrogen storage system for multi-energy complementary power system. In: *2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*. 2023, s. 765–770. IEEE.
- [21] FIALA, P. a DREXLER, P. Energy harvesting circuit for sensor system power supply. In *Smart Sensors, Actuators, and MEMS*. Vol. 8066. 2011, s. 400–412. SPIE. DOI: 10.1117/12.884768.
- [22] FIALA, P., VOJTEK, T. a BĚHUNEK, I. Minigenerator – Analysis, Design and Tests. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2011, 5(1), 241–244.
- [23] ŠPĚROVÁ, A. a FIALA, P. Finite element analysis of vibrational micro-generator. *Acta Technica ČSAV*, 2006, 51(3), 289–299.
- [24] FIALA, P. Novel vibrational and solar energy harvesters. *SPIE Professional Magazine*, 2011, roč. 2011, č. 1, s. 1–3. ISSN 1994-4403.
- [25] ZUKAL, J., SZABÓ, Z., KRÍŽ, T., KADLEC, R., DĚDKOVÁ, J. a FIALA, P. A Robust Generator–Harvester for Independent Sensor Systems. *Applied Sciences*, 2024, 14(3), 1246. DOI: 10.3390/app14031246.

- [26] ZUKAL, J., FIALA, P., SZABÓ, Z., DĚDKOVÁ, J. a PERNICA, R. Coupled numerical model of vibration-based harvester. *Applied Sciences*, 2020, 10(8), 2725. DOI: 10.3390/app10082725.
- [27] SZABÓ, Z., FIALA, P., ZUKAL, J., DĚDKOVÁ, J. a DOHNAL, P. Optimal structural design of a magnetic circuit for vibration harvesters applicable in MEMS. *Symmetry*, 2020, 12(1), 110. DOI: 10.3390/sym12010110.
- [28] SZABÓ, Z., FIALA, P. a DOHNAL, P. Magnetic circuit modifications in resonant vibration harvesters. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 99, 832–845. DOI: 10.1016/j.ymsp.2017.07.016.
- [29] STEINBAUER, M., PERNICA, R., ZUKAL, J., KADLEC, R., BACHOREC, T. a FIALA, P. Modeling Electromagnetic Nanostructures and Experimenting with Nanoelectric Elements to Form Periodic Structures. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska*, 2020, 10(4), 4–14. ISSN 2083-0157.
- [30] FIALA, P. Novel vibrational and solar energy harvesters. *SPIE Professional Magazine*, 2011, roč. 2011, č. 1, s. 1–3. ISSN 1994-4403.
- [31] FIALA, P., SZABÓ, Z., MARCOŇ, P., ROUBAL, Z. a KRŽÍŽ, T. Mini-and microgenerators magnetic circuits design. In: *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS)*. 2017, s. 82–89. IEEE.
- [32] ZUKAL, J., SZABÓ, Z., PERNICA, R., KADLEC, R., DĚDKOVÁ, J., KLÍMA, M. a FIALA, P. Designing a Robust Model of a Linear Motion-driven Harvester. In: *2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*. 2023, s. 732–738. IEEE.
- [33] FIALA, P., SZABÓ, Z., MARCOŇ, P. a ROUBAL, Z. Mini-and microgenerators applicable in the MEMS technology. In: *Smart Sensors, Actuators, and MEMS VIII*. Vol. 10246. 2017, s. 282–289. SPIE.
- [34] FIORINI, P., DOMS, I., VAN HOOFF, C. a VULLERS, R. Micropower energy scavenging. In: *ESSCIRC 2008 – 34th European Solid-State Circuits Conference*. 2008, s. 4–9. IEEE.
- [35] PIMENTEL, D. a MUSÍLEK, P. Power management with energy harvesting devices. In: *CCECE 2010*. 2010, s. 1–4. IEEE.
- [36] ROTARU, M., TAN, Y. K. a SYKULSKI, J. K. Numerical Analysis and Optimization of an Electromagnetic Micro-Generator for Vibration Energy Harvesting Applications.
- [37] DING, R. a XING, B. Comparative Research on the Way of Energy Harvesting of the Wireless Sensor Network Nodes. In: *2013 6th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS)*. 2013, s. 289–291. IEEE.
- [38] ALAPHILIPPE, M., STOUFFS, P. a MARQUET, D. Remote site electrical energy production by solar hybrid system using hot air engine. In: *INTELEC 07 – 29th International Telecommunications Energy Conference*. 2007, s. 142–146. IEEE.
- [39] JÁRDÁN, R. K., NAGY, I. a SCHENDL, N. Enhanced utilisation of solar radiation for the generation of electric energy. In: *2004 IEEE Africon*. 2004, s. 619–624. IEEE.
- [40] DONG, H., LIU, J., MENG, T., LI, M., CHEN, X., LI, N. a ALAVI, H. Energy generation and storing electrical energy in an energy hybrid system consisting of solar thermal collector, Stirling engine and thermoelectric generator. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 75, 103357.
- [41] ZUKAL, J., SZABÓ, Z., KLÍMA, M. a FIALA, P. Alternative Energy Sources Usable in Automotive Transport. *Inventions*, 2024, 9(6), 125.
- [42] RAMSAROOP, N., OLUGBARA, O. O. a JOUBERT, E. Exploring energy harvesting technology for wireless charging of mobile device batteries. In: *2017 Conference on Information Communication Technology and Society (ICTAS)*. 2017, s. 1–5. IEEE.
- [43] KHAN, M. R., ISLAM, M. A., RANA, M. M., HAQUE, T. a JOY, S. I. I. A Circuit Model for Energy Harvesting from Fringing Electric Fields for Mobile Wearable Device Applications. *Energies*, 2021, 14(21), 7016.
- [44] MOGHE, R., YANG, Y., LAMBERT, F. a DIVAN, D. A scoping study of electric and magnetic field energy harvesting for wireless sensor networks in power system applications. In: *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. 2009, s. 3550–3557. IEEE.
- [45] MAAMER, B., JAZIRI, N., KAZIZ, S. a TOUNSI, F. Towards Autonomous Node Sensors: Green Versus RF Energy Harvesting. In: *2021 IEEE International Conference on Design & Test of Integrated Micro & Nano-Systems (DTS)*. 2021, s. 1–5. IEEE.

- [46] RUBES, O., CHALUPA, J., KSICA, F. a HADAS, Z. Development and experimental validation of self-powered wireless vibration sensor node using vibration energy harvester. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 160. DOI: 10.1016/j.ymsp.2021.107890.
- [47] LUO, X., WANG, J., DOONER, M. a CLARKE, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 2015, 137, 511–536.
- [48] GEARINO, D. A Major Technology for Long-Duration Energy Storage Is Approaching Its Moment of Truth. *Inside Climate News*, 2. 5. 2024. Dostupné z: <https://insideclimatenews.org/news/02052024/inside-clean-energy-long-duration-energy-storage-technology/>. [cit. 2024-10-28].
- [49] MARKHAM, D. Augwind To Build 120 MWh Of Compressed Air Energy Storage For Solar In Israel. *Clean Technica*, 7. 1. 2021. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2021/01/25/augwind-to-build-120-mwh-of-compressed-air-energy-storage-for-solar-in-israel/>. [cit. 2024-10-28].
- [50] FAMOURI, P., CAWTHORNE, W. R., CLARK, N., NANDKUMAR, S., ATKINSON, C., ATKINSON, R. a PETREANU, S. Design and testing of a novel linear alternator and engine system for remote electrical power generation. In: *IEEE Engineering Society Winter Meeting*. 1999, 1, 108–112.
- [51] CAWTHORNE, W. R., FAMOURI, P., CHEN, J., CLARK, N. N., McDANIEL, T. I., ATKINSON, R. J., PETREANU, S. Development of a linear alternator-engine for hybrid electric vehicle applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1999, 48(6), s. 1797–1802. doi:10.1109/25.806772.
- [52] CAWTHORNE, W., FAMOURI, P., CLARK, N. Integrated design of linear alternator/engine system for HEV auxiliary power unit. In: *IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. 2001, s. 267–274. doi:10.1109/IEMDC.2001.939310.
- [53] NOR, K. M., AROF, H., WIJONO. Design of a 5 kW tubular permanent magnet linear generator. In: *39th International Universities Power Engineering Conference UPEC 2004*. 2004, s. 528–532.
- [54] PING, H. W., AROF, H., WIJONO. Design of a permanent magnet linear generator. In: *IFOST 2006 – 1st International Forum on Strategic Technology*. 2006, s. 231–234. doi:10.1109/IFOST.2006.312295.
- [55] TAKAHARA, K., OHSAKI, S., ITOH, Y., OHYAMA, K., KAWAGUCHI, H. Characteristic analysis and trial manufacture of permanent-magnetic type linear generator. *Electrical Engineering in Japan*, 2009, 166(3), s. 94–100. doi:10.1002/eej.20751.
- [56] RINDERKNECHT, F., HERZOG, H. Calculation of a linear generator for a hybrid vehicle concept. In: *19th International Conference on Electrical Machines ICEM 2010*. 2010. doi:10.1109/ICELMACH.2010.5607780.
- [57] LI, W., GAO, S., WU, D., ZHANG, X. Design of a linear magnetic-gear free-piston generator for series hybrid electric vehicles. In: *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference VPPC 2010*. 2010. doi:10.1109/VPPC.2010.5729021.
- [58] FAZAL, I., KARSITI, M. N., ZULKIFLI, S. A., IBRAHIM, T., RAO, K. S. R. Modeling and simulation of a moving-coil linear generator. In: *ICIAS 2010 – International Conference on Intelligent and Advanced Systems*. 2010. doi:10.1109/ICIAS.2010.5716156.
- [59] RINDERKNECHT, F., HERZOG, H. Adaptation and optimization of a linear generator for a hybrid vehicle concept. *World Electric Vehicle Journal*, 2011, 4(1), s. 1–8. doi:10.3390/wevj4010001.
- [60] OPREA, C. A., SZABÓ, L., MARȚIȘ, C. S. Multi-Phase Linear Generator for Electric Vehicle Applications. *Advanced Engineering Forum*, 2013, 8–9, s. 461–468. doi:10.4028/www.scientific.net/AEF.8-9.461.
- [61] OPREA, C. A., SZABÓ, L., MARȚIȘ, C. S. Linear permanent magnet electric generator for free piston engine applications. In: *ICEM 2012 – 20th International Conference on Electrical Machines*. 2012, s. 691–696. doi:10.1109/ICEIMach.2012.6349946.
- [62] SEO, U., RIEMER, B., APPUNN, R., HAMEYER, K. Design considerations of a linear generator for a range extender application. *Archives of Electrical Engineering*, 2015, 64(4), s. 581–592. doi:10.1515/aee-2015-0043.
- [63] HERNANDEZ, I., SEGUNDO, J., GONZALEZ, X., LUNA, D., JUAREZ, Z. Performance and power quality assessment of a linear electric generator focused on microgeneration applications. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2017. doi:10.1002/etep.2326.

- [64] ZOU, H., WANG, M., TANG, M., LI, C., TIAN, C. Experimental investigation and performance analysis of a direct-driven linear generator. *Energy Procedia*, 2017, 142, s. 284–290. doi:10.1016/j.egypro.2017.12.045.
- [65] YAMANAKA, Y., NIREI, M., SATO, M., MURATA, H., BU, Y., MIZUNO, T. Design of linear synchronous generator suitable for free-piston engine linear generator system. In: *LDIA 2017 – 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications*. 2017. doi:10.23919/LDIA.2017.8097243.
- [66] ABDALLA, I. I., ZAINAL, A. E. Z., RAMLAN, N. A., FIRMANSYAH, AZIZ, A. R. A., HEIKAL, M. R. Cogging force investigation of a free piston permanent magnet linear generator. *IOP Materials Science and Engineering*, 2017, 257(1). doi:10.1088/1757-899X/257/1/012055.
- [67] ABDALLA, I. I., ZAINAL, A. E. Z., ANWARUDIN, A. R. T., FIRMANSYAH, AZIZ, A. R. A., HEIKAL, M. R. Cogging force issues of permanent magnet linear generator for electric vehicle. *Journal of Electrical Systems*, 2017, 13(3), s. 489–502.
- [68] ABDALLA, I., ZAINAL, E. Z. A., RAMLAN, N. A., FIRMANSYAH, AZIZ, A. R. A., HEIKAL, M. Free piston linear generator for low grid power generation. *MATEC Web of Conferences*, 2017, 131. doi:10.1051/mateconf/201713102007.
- [69] JALAL, A. S., BAKER, N. J., WU, D. The effect of power converter on the design of a linear alternator for use with a joule cycle-free piston engine. In: *IEMDC 2017 – IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. 2017. doi:10.1109/IEMDC.2017.8002218.
- [70] SUBRAMANIAN, J., HEISKELL, G., MAHMUDZADEH, F., FAMOURI, P. Study of radial and axial magnets for linear alternator - free piston engine system. In: *NAPS 2017 – North American Power Symposium*. 2017. doi:10.1109/NAPS.2017.8107293.
- [71] YAMANAKA, Y., GOTO, T., MIZUNO, T., NIREI, M., SUZUKI, T., SATO, M., BU, Y. Examination of miniaturization using a double stator for a free-piston engine linear generator system. In: *ICEMS 2018 – 21st International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2018, s. 143–148. doi:10.23919/ICEMS.2018.8549101.
- [72] YAMANAKA, Y., SATO, M., BU, Y., NIREI, M., MURATA, H., MIZUNO, T. Design of a linear synchronous generator and examination of the driving range for a free-piston engine linear generator system. *IEEJ Journal of Industry Applications*, 2018, 7(4), s. 351–357. doi:10.1541/ieejia.7.351.
- [73] GUO, R., YU, H., XIA, T., SHI, Z., ZHONG, W., LIU, X. A simplified subdomain analytical model for the design and analysis of a tubular linear permanent magnet oscillation generator. *IEEE Access*, 2018, 6, s. 42355–42367. doi:10.1109/ACCESS.2018.2859021.
- [74] SCHILLINGMANN, H., MAURUS, Q., HENKE, M. Linear generator design for a free-piston engine with high force density. In: *LDIA 2019 – 12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications*. 2019. doi:10.1109/LDIA.2019.8770996.
- [75] LIU, C., GAO, H., XIONG, Y., ZHOU, S., FU, W. Detent force reduction in permanent magnet linear synchronous motor based on magnetic field similarity method. *IEEE Access*, 2019, 7, s. 57341–57348. doi:10.1109/ACCESS.2019.2913867.
- [76] BAKER, N. J., KORBEKANDI, R. M., WU, D., JALAL, A. S. An investigation of short translator linear machines for use in a free piston engine. In: *IEMDC 2019 – IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. 2019, s. 68–73. doi:10.1109/IEMDC.2019.8785125.
- [77] BAKER, N. J., KORBEKANDI, R. M., WANG, J., JALAL, A. S. Experimental comparison of two linear machines developed for the free piston engine. In: *PEMD 2018 – Power Electronics, Machines and Drives*. 2018, s. 4406–4410. doi:10.1049/joe.2018.8214.
- [78] XU, Y., ZHAO, D., WANG, Y., AI, M. Electromagnetic Characteristics of Permanent Magnet Linear Generator (PMLG) Applied to Free-Piston Engine (FPE). *IEEE Access*, 2019, 7, s. 48013–48023. doi:10.1109/ACCESS.2019.2909278.
- [79] SUBRAMANIAN, J., MAHMUDZADEH, F., BADE, M., FAMOURI, P. Simulation and experimental validation of equivalent circuit parameters and core loss in a tubular permanent magnet linear generator for free piston engine applications. In: *IEMDC 2019*. 2019, s. 57–62. doi:10.1109/IEMDC.2019.8785345.
- [80] YANG, L., XU, Z., LIU, L., LIU, N., YU, H. A Tubular PM Linear Generator With a Coreless Moving-Coil for Free-Piston Engines. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, 34(3), s. 1309–1316. doi:10.1109/TEC.2019.2893069.

- [81] SUN, Y., XU, Z., ZHANG, Q., LIU, L. A plate moving-magnet linear generator designed for free-piston engines. *IEEE Access*, 2020, 8, s. 75135–75144. doi:10.1109/ACCESS.2020.2988696.
- [82] CHEN, H., ZHAO, S., WANG, H., NIE, R. A novel single-phase tubular permanent magnet linear generator. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30(4). doi:10.1109/TASC.2020.2976948.
- [83] ATKINSON, C. M., PETREANU, S., CLARK, N. N., ATKINSON, R. J., McDANIEL, T. I., NANDKUMAR, S., FAMOURI, P. Numerical simulation of a two-stroke linear engine-alternator combination. *SAE Technical Papers*, 1999. doi:10.4271/1999-01-0921.
- [84] PETREANU, S. Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports. West Virginia University, 2001.
- [85] MIKALSEN, R., ROSKILLY, A. P. Performance simulation of a spark ignited free-piston engine generator. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(14–15), s. 1726–1733. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.11.015.
- [86] MIKALSEN, R., ROSKILLY, A. P. The design and simulation of a two-stroke free-piston compression ignition engine for electrical power generation. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(5–6), s. 589–600. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.04.009.
- [87] IRIE, S., SATO, M., MIZUNO, T., NISHIMURA, F., NAGANUMA, K. Quad-cylinder structure for electrical loss-reduction in free-piston engine linear generator with four-stroke engine. *2022 IEEE 7th Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, 2022, s. 1–6.
- [88] RINDERKNECHT, F., HERZOG, H. A high efficient energy converter for a hybrid vehicle concept – gas spring focused. *EVER Monaco* 2011.
- [89] GUO, C., FENG, H., JIA, B., ZUO, Z., GUO, Y., ROSKILLY, T. Research on the operation characteristics of a free-piston linear generator: Numerical model and experimental results. *Energy Conversion and Management*, 2017, 131, s. 32–43. doi:10.1016/j.enconman.2016.11.010.
- [90] MIAO, Y., ZUO, Z., FENG, H., GUO, C., SONG, Y., JIA, B., GUO, Y. Research on the combustion characteristics of a free-piston gasoline engine linear generator during the stable generating process. *Energies*, 2016, 9(8). doi:10.3390/en9080655.
- [91] YUAN, C., FENG, H., HE, Y. Experimental research on the combustion and heat release characteristics of a free-piston diesel engine generator. *Fuel*, 2017, 188, s. 390–400. doi:10.1016/j.fuel.2016.10.057.
- [92] YUAN, C., HAN, C., XU, J. Numerical evaluation of pilot-ignition technology used for a hydrogen fuelled free piston engine generator. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(47), s. 28599–28611. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.09.131.
- [93] JIA, B., ZUO, Z., SMALLBONE, A., FENG, H., ROSKILLY, A. P. A decoupled design parameter analysis for free-piston engine generators. *Energies*, 2017, 10(4). doi:10.3390/en10040486.
- [94] JIA, B., WU, D., SMALLBONE, A., LAWRENCE, C., ROSKILLY, A. P. Design, modelling and validation of a linear joule engine generator designed for renewable energy sources. *Energy Conversion and Management*, 2018, 165, s. 25–34. doi:10.1016/j.enconman.2018.03.050.
- [95] JIA, B., WU, D., SMALLBONE, A., NGWAKA, U. C., ROSKILLY, A. P. Dynamic and thermodynamic characteristics of a linear joule engine generator with different operating conditions. *Energy Conversion and Management*, 2018, 173, s. 375–382. doi:10.1016/j.enconman.2018.07.098.
- [96] NGWAKA, U., JIA, B., LAWRENCE, C., WU, D., SMALLBONE, A., ROSKILLY, A. P. The characteristics of a linear joule engine generator operating on a dry friction principle. *Applied Energy*, 2019, 237, s. 49–59. doi:10.1016/j.apenergy.2018.12.081.
- [97] CHENDONG, G., ZUO, Z., JIA, B., ZIWEI, Z., HUIHUA, F., ROSKILLY, A. P. Parametric analysis of a dual-piston type free-piston gasoline engine linear generator. *Energy Procedia*, 2019, 158, s. 1431–1436. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.346.
- [98] SHMELEV, V. An internal combustion alternator with both free piston and cylinder. *Engineering Science and Technology*, 2019, 22(3), s. 947–955. doi:10.1016/j.jestch.2019.01.009.
- [99] ZHOU, Y., SOFIANOPOULOS, A., GAINEY, B., LAWLER, B., MAMALIS, S. A system-level numerical study of an HCCI spring-assisted free piston linear alternator with various piston motion profiles. *Applied Energy*, 2019, 239, s. 820–835. doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.240.
- [100] YAN, H., XU, Z., LU, J., LIU, D., JIANG, X. A reciprocating motion control strategy of single-cylinder free-piston engine generator. *Electronics*, 2020, 9(2). doi:10.3390/electronics9020245.

- [101] PAVEL, N., MICHAL, Š., ONDŘEJ, V. Modeling and control of free-piston generator. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), 2004, 37(14), s. 617–622. doi:10.1016/S1474-6670(17)31171-0.
- [102] PAVEL, N., MICHAL, Š., ONDŘEJ, V. Modeling and control of linear combustion engine. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), 2004, s. 305–310.
- [103] NĚMEČEK, P., ŠINDELKA, M., VYSOKÝ, O. Ensuring steady operation of free-piston generator. In: WMSCI 2005 – 9th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. 2005, sv. 2, s. 228–232.
- [104] DEUTSCH, P., VYSOKÝ, O., RICARDO PRAGUE S.R.O. In-cycle thermodynamic model of linear combustion engine. In: IEEE International Conference on Control Applications. 2006, s. 2430–2435. doi:10.1109/CACSD-CCA-ISIC.2006.4777021.
- [105] ONDŘEJ, V. Linear combustion engine as main energy unit for hybrid vehicles. In: Transtec Prague 2007. 2007, s. 1–9.
- [106] CLARK, N. N., McDANIEL, T. I., ATKINSON, R. J., NANDKUMAR, S., ATKINSON, C., PETREANU, S., FAMOURI, P. Modeling and development of a linear engine. In: ASME Spring Technical Conference. 1998, Paper No. 98-ICE-95.
- [107] FREDRIKSSON, J., DENBRATT, I. Simulation of a two-stroke free piston engine. SAE Technical Paper 2004-01-0187. SAE International, 2004.
- [108] VAN BLARIGAN, P. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review. NREL/CP-570-30535, Sandia National Laboratories, Livermore, 2001.
- [109] LI, Q., XIAO, J., HUANG, Z. Simulation of a two-stroke free-piston engine for electrical power generation. Energy and Fuels, 2008, 22(5), s. 3443–3449. doi:10.1021/ef800217k.
- [110] WANG, Q., WU, F., ZHAO, Y., BAI, J., HUANG, R. Study on combustion characteristics and ignition limits extending of micro free-piston engines. Energy, 2019, 179, s. 805–814. doi:10.1016/j.energy.2019.05.003.
- [111] JIA, B., ZUO, Z., TIAN, G., FENG, H., ROSKILLY, A. P. Development and validation of a free-piston engine generator numerical model. Energy Conversion and Management, 2015, 91, s. 333–341. doi:10.1016/j.enconman.2014.11.054.
- [112] FENG, H., SONG, Y., ZUO, Z., SHANG, J., WANG, Y., ROSKILLY, A. P. Stable operation and electricity generating characteristics of a single-cylinder free piston engine linear generator: Simulation and experiments. Energies, 2015, 8(2), s. 765–785. doi:10.3390/en8020765.
- [113] JIA, B., MIKALSEN, R., SMALLBONE, A., ZUO, Z., FENG, H., ROSKILLY, A. P. Piston motion control of a free-piston engine generator: A new approach using cascade control. Applied Energy, 2016, 179, s. 1166–1175. doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.081.
- [114] SUN, P., ZHANG, C., CHEN, J., ZHAO, F., LIAO, Y., YANG, G., CHEN, C. Decoupling design and verification of a free-piston linear generator. Energies, 2016, 9(12). doi:10.3390/en9121067.
- [115] SUN, P., ZHANG, C., CHEN, J., ZHAO, F., LIAO, Y., YANG, G., CHEN, C. Hybrid system modeling and full cycle operation analysis of a two-stroke free-piston linear generator. Energies, 2017, 10(2). doi:10.3390/en10020213.
- [116] NERUBENKO, G., KRUPENIN, V., NERUBENKO, C. Vehicle hybrid free-piston engine-generator. In: Engineering for Rural Development. 2017, 16, s. 114–120. doi:10.22616/ERDev2017.16.N020.
- [117] LIU, D., XU, Z., LIU, L., ZHANG, L., ZHOU, H. Modeling and control of a portable two-stroke free-piston engine generator. In: IEEE International Conference on Mechatronics and Automation ICMA 2018. 2018, s. 2316–2321. doi:10.1109/ICMA.2018.8484554.
- [118] SUZUKI, T., NAGANUMA, K., NIREI, M., YAMANAKA, Y., GOTO, T., SATO, M., MIZUNO, T. Examination of a free-piston engine linear generator system with opposite-side combustion. In: 12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications LDIA 2019. 2019. doi:10.1109/LDIA.2019.8770978.
- [119] SATO, M., YAMANAKA, Y., BU, Y., NIREI, M., MURATA, H., MIZUNO, T. Operation range of generation braking force to achieve high efficiency considering combustion in a free-piston engine linear generator system. IEEE Journal of Industry Applications, 2018, 7(4), s. 343–350. doi:10.1541/ieejia.7.343.
- [120] ZHANG, C., CHEN, F., LI, L., XU, Z., LIU, L., YANG, G., TIAN, Y. A free-piston linear generator control strategy for improving output power. Energies, 2018, 11(1). doi:10.3390/en11010135.

- [121] WANG, X., CHEN, F., ZHU, R., YANG, G., ZHANG, C. A review of the design and control of free-piston linear generator. *Energies*, 2018, 11(8). doi:10.3390/en11082179.
- [122] SATO, M., NAGANUMA, K., NIREI, M., YAMANAKA, Y., SUZUKI, T., GOTO, T., MIZUNO, T. Improving the constant-volume degree of combustion considering generatable range at low speed in a free-piston engine linear generator system. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2019, 14(11), s. 1703–1710. doi:10.1002/tee.22993.
- [123] ZHANG, X., KATZBERG, J., COOKE, B., KOS, J. Modeling and simulation of a hybrid-engine. In: *IEEE WESCANEX 97 – Communications, Power and Computing*. 1997, s. 286–291. doi:10.1109/WESCAN.1997.627155.
- [124] PAVELKA, J. Analysis of combustion engine - electric linear generator set operation. In: *13th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2008*. 2008, s. 988–993. doi:10.1109/EPEPEMC.2008.4635396.
- [125] TIKKANEN, R. S., VILENIUS, M. Hydraulic free piston engine – challenge for control. In: *European Control Conference ECC 1999*. 1999, s. 2943–2948. doi:10.23919/ECC.1999.7099776.
- [126] HIBI, A., ITO, T. Fundamental test results of a hydraulic free piston internal combustion engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2004, 218(10), s. 1149–1157. doi:10.1177/095440700421801010.
- [127] YUAN, S., WU, W. Simulation study of a two-stroke single piston hydraulic free piston engine. In: *2008 Asia Simulation Conference – 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing*. 2008, s. 1244–1249. doi:10.1109/ASC-ICSC.2008.4675560.
- [128] HANSSON, J. Analysis and control of a hybrid vehicle powered by a free-piston energy converter. *Royal Institute of Technology (KTH), School of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics*, 2006.
- [129] GRAEF, M., TREFFINGER, P., POHL, S., RINDERKNECHT, F. Investigation of a high efficient free piston linear generator with variable stroke and variable compression ratio: A new approach for free piston engines. *World Electric Vehicle Journal*, 2007, 1(1), s. 116–120. doi:10.3390/wevj1010116.
- [130] MIKALSEN, R., ROSKILLY, A. P. A review of free-piston engine history and applications. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(14–15), s. 2339–2352. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.03.015.
- [131] LI, J., ZUO, Z., JIA, B., FENG, H., MEI, B., SMALLBONE, A., ROSKILLY, A. P. Operating characteristics and design parameter optimization of permanent magnet linear generator applied to free-piston energy converter. *Energy*, 2024, 287, 129687.
- [132] VIRSIK, R., HERON, A. Free piston linear generator in comparison to other range-extender technologies. *World Electric Vehicle Journal*, 2013, 6(2), s. 426–435. doi:10.3390/wevj6020426.
- [133] SCHNEIDER, S., RINDERKNECHT, F., FRIEDRICH, H. E. Design of future concepts and variants of the free piston linear generator. In: *9th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies EVER 2014*. 2014. doi:10.1109/EVER.2014.6844029.
- [134] FERRARI, C., FRIEDRICH, H. E. Development of a free-piston linear generator for use in an extended-range electric vehicle. In: *26th Electric Vehicle Symposium EVS26*. 2012, 2, s. 1114–1119.
- [135] LIM, O., OH, Y., LEE, J., KIM, K. An investigation about generating electric power on operated parameters of powerpack utilizing linear engine. In: *World Electric Vehicle Symposium and Exhibition EVS 2013*. 2013. doi:10.1109/EVS.2013.6914911.
- [136] RINDERKNECHT, F. A highly efficient energy converter for a hybrid vehicle concept – focused on the linear generator of the next generation. In: *8th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies EVER 2013*. 2013. doi:10.1109/EVER.2013.6521533.
- [137] LIM, O., HUNG, N. B., IIDA, N. A power generation study of a power pack based on operating parameters of the linear engine fuelled with propane. *Energy Procedia*, 2014, 61, s. 1581–1584. doi:10.1016/j.egypro.2014.12.176.
- [138] HANIPAH, M. R., MIKALSEN, R., ROSKILLY, A. P. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 75, s. 493–503. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.09.039.
- [139] JIA, B., SMALLBONE, A., MIKALSEN, R., FENG, H., ZUO, Z., ROSKILLY, A. P. Disturbance analysis of a free-piston engine generator using a validated fast-response numerical model. *Applied Energy*, 2017, 185, s. 440–451. doi:10.1016/j.apenergy.2016.10.143.

- [140] JIA, B., SMALLBONE, A., MIKALSEN, R., SHIVAPRASAD, K. V., ROY, S., ROSKILLY, A. P. Performance analysis of a flexi-fuel turbine-combined free-piston engine generator. *Energies*, 2019, 12(14). doi:10.3390/en12142657.
- [141] BAKER, N. J., KORBKANDI, R. M., WU, D., JALAL, A. S. Performance of a tubular machine driven by an external-combustion free-piston engine. In: *International Conference on Power Electronics, Machines and Drives PEMD 2018*. 2018, s. 3867–3871. doi:10.1049/joe.2018.8158.
- [142] CAWTHORNE, W. R. Optimization of a brushless permanent magnet linear alternator for use with a linear internal combustion engine. *Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports 3160*. West Virginia University, 1999.
- [143] KOSAKA, H., AKITA, T., MORIYA, K., GOTO, S., aj. Development of free piston engine linear generator system. Part 1 – Investigation of fundamental characteristics. *SAE Technical Paper 2014-01-1203*. SAE International, 2014. doi:10.4271/2014-01-1203.
- [144] GOTO, S., MORIYA, K., KOSAKA, H., AKITA, T., aj. Development of free piston engine linear generator system. Part 2 – Investigation of control system for generator. *SAE Technical Paper 2014-01-1193*. SAE International, 2014. doi:10.4271/2014-01-1193.
- [145] MORIYA, K., GOTO, S., AKITA, T., KOSAKA, H., aj. Development of free piston engine linear generator system. Part 3 – Novel control method of linear generator to improve efficiency and stability. *SAE Technical Paper 2016-01-0685*. SAE International, 2016. doi:10.4271/2016-01-0685.
- [146] CARESANA, F., COMODI, G., PELAGALLI, L. Design approach for a two-stroke free piston engine for electric power generation. *SAE Technical Paper 2004-32-0037 / 20044324*. SAE International, 2004.
- [147] KOCK, F., HAAG, J., FRIEDRICH, H. E. The free piston linear generator – development of an innovative, compact, highly efficient range-extender module. *SAE Technical Paper 2013-01-1727*. SAE International, 2013.
- [148] RINDERKNECHT, F., KOCK, F. A high efficient energy converter for a hybrid vehicle concept. In: *EVS26 – Electric Vehicle Symposium*. Los Angeles, 6.–9. května 2012.
- [149] MAIELLO, A., BEATRICE, C., CAPUANO, R., SAVIANO, R., NAPOLITANO, P. Simulation methodology and numerical comparison of boxer and opposed free piston linear generator configuration in OD/ID environment. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 246, 122945.
- [150] MOLLA, S., FARROK, O., ALAM, M. J. Translator optimization of a linear electrical generator for harvesting oceanic wave energy. In: *IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies GlobConET 2023*. 2023, s. 1–6. IEEE.
- [151] GUO, R., WU, Y., MA, X., AGGIDIS, G., ZHAO, N. Grid Integration of a Novel Linear-Generator-Based Wave Power Conversion System. *2024 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 2024, September, s. 1–6. IEEE.
- [152] FAIAD, A. A., GOWAID, I. A. Linear generator technologies for wave energy conversion applications: A review. *2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2018, September, s. 1–6. IEEE.
- [153] AHAMED, R., McKEE, K., HOWARD, I. A review of the linear generator type of wave energy converters' power take-off systems. *Sustainability*, 2022, 14(16), 9936.
- [154] MOHAMED, K. H., SAHOO, N. C., IBRAHIM, T. B. A survey of technologies used in wave energy conversion systems. *2011 International Conference on Energy, Automation and Signal*, 2011, December, s. 1–6. IEEE.
- [155] FAIZ, J., NEMATSABERI, A. Linear permanent magnet generator concepts for direct-drive wave energy converters: A comprehensive review. *2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2017, June, s. 618–623. IEEE.
- [156] RAHMAN, A., FARROK, O., ISLAM, M. R., XU, W. Recent progress in electrical generators for oceanic wave energy conversion. *IEEE Access*, 2020, 8, 138595–138615.
- [157] MUETZE, A., VINING, J. G. Ocean wave energy conversion – a survey. *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-first IAS Annual Meeting, 2006*, sv. 3, s. 1410–1417. IEEE.
- [158] LI, Z., NIU, S. Design of a novel hybrid-excited transverse flux tubular linear machine with complementary structure. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, 58(8), 1–6.

- [159] FARAHANI, E. F., BAKER, N. J. Investigation of a low speed tubular linear generator with inter-modular permanent magnets. *IET Conference Proceedings CP878*, 2024, sv. 2024, č. 3, s. 269–276. The Institution of Engineering and Technology, Stevenage, UK.
- [160] LI, W., ZHU, L., WU, W., LI, B., JIN, X., HUANG, M. Analysis and Optimization of a Novel Flux Modulation Linear Permanent Magnet Generator for Wave Energy Converter. *IECON 2023 – 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2023, October, s. 1–6. IEEE.
- [161] LIU, J., LIAO, S., YAN, J., XU, C., SANG, Z., YU, Y., ZHOU, Y. Design of a Linear Vernier Permanent Magnet Generator with Improved Power Factor for Inland-Water Wave Energy Conversion. *2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2023, November, s. 2916–2920. IEEE.
- [162] CONSOLO, V., SANI, L., RAUGI, M., MUSOLINO, A. Double Slider-Modular Stator Linear Permanent Magnet Generator for Sea Wave Energy Harvesting: Experimental Validation. *2023 12th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2023, August, s. 225–230. IEEE.
- [163] CHEN, M., HUANG, L., LI, Y., TAN, P., AHMAD, G., LIU, Y., HU, M. Analysis of magnetic gearing effect in field-modulated transverse flux linear generator for direct drive wave energy conversion. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2021, 58(2), 1–5.
- [164] YAMANOUCHI, Y., TSUCHIYA, M., KOGA, R., YAMAGUCHI, K., IZUMI, M., IDA, T. Conceptual Design of a Linear Power Generator for Undulator-type Tidal Current Power Generation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2024.
- [165] PAN, X., LING, P., BAO, H., HE, W., LI, Q., YAN, B. Tumbler-inspired electromagnetic generator for low-frequency ocean wave energy harvesting. *Energy Conversion and Management*, 2023, 294, 117569.
- [166] HASHFI, T. B., WAHYUDDIE, A., ELAMIN, A. Y., MON, B. F., AKBAR, S. Energy Management for Single Machine Permanent Magnet Linear Generator (PMLG) for Stand-Alone Application. *2023 International Conference on Control, Communication and Computing (ICCC)*, 2023, May, s. 1–6. IEEE.
- [167] ZHANG, J., HUANG, L., YANG, J., LIU, H., WU, S., MOU, Z. Improved Equivalent Model-Based Control PMLSG for Maximum Energy Harvesting in Irregular Waves for Direct-Driven Wave Energy Converters. *2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2024, September, s. 1–7. IEEE.
- [168] CURTO, D., FRANZITTA, V., GUERCIO, A., TRAPANESE, M. Testing a linear ironless generator for the sea wave energy harvesting. *OCEANS 2022 – Chennai*, 2022, February, s. 1–5. IEEE.
- [169] SIDDIQUE, A. R. M., MAHMUD, S., VAN HEYST, B. A comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms. *Energy Conversion and Management*, 2015, 106, 728–747.
- [170] BEEBY, S. P., TORAH, R. N., TORAH, M. J., O'DONNELL, T., SAHA, C. R., ROY, S. A microelectromagnetic generator for vibration energy harvesting. *J. Micromech. Microeng.*, 2007, 17, 1257–1265.
- [171] ZHU, D., ROBERTS, S., TUDOR, M. J., BEEBY, S. P. Design and experimental characterization of a tunable vibration-based electromagnetic micro-generator. *Sens. Actuators A Phys.*, 2010, 158, 284–293.
- [172] FOISAL, A. R. M., HONG, C., CHUNG, G. S. Multi-frequency electromagnetic energy harvester using a magnetic spring cantilever. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 182, 106–113.
- [173] MUNAZ, A., LEE, B. C., CHUNG, G. S. A study of an electromagnetic energy harvester using multi-pole magnet. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 201, 134–140.
- [174] LEE, B.-C., RAHMAN, A., HYUN, S.-H., CHUNG, G.-S. Low frequency driven electromagnetic energy harvester for self-powered system. *Smart Mater. Struct.*, 2012, 21, 125024.
- [175] YANG, J., YU, Q., ZHAO, J., ZHAO, N., WEN, Y., LI, P., QIU, J. Design and optimization of a bi-axial vibration-driven electromagnetic generator. *J. Appl. Phys.*, 2014, 116, 114506.
- [176] SCHERRER, S., PLUMLEE, D. G., MOLL, A. J. Energy scavenging device in LTCC materials. *2005 IEEE Workshop on Microelectronics and Electron Devices, WMED'05*, 2005, April, s. 77–78. IEEE.
- [177] BEEBY, S. P., TUDOR, M. J., WHITE, N. M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(12), R175.

- [178] CHEN, H., CONG, T. N., YANG, W., TAN, C., LI, Y., DING, Y. Progress in electrical energy storage system: a critical review. *Prog. Nat. Sci.*, 2009, 19, 291–312.
- [179] Status of electrical energy storage systems. DTI report DG/DTI/00050/00/00, urn no. 04/1878. UK Department of Trade and Industry, 2004, s. 1–24.
- [180] IBRAHIM, H., ILINCA, A., PERRON, J. Energy storage systems – characteristics and comparisons. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 2008, 12, 1221–1250.
- [181] DÍAZ-GONZÁLEZ, F., SUMPER, A., GOMIS-BELLMUNT, O., VILLAFÁFILA-ROBLES, R. A review of energy storage technologies for wind power applications. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 2012, 16, 2154–2171.
- [182] BEAUDIN, M., ZAREIPOUR, H., SCHELLENBERGLABE, A., ROSEHART, W. Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: an updated review. *Energy Sust. Dev.*, 2010, 14, 302–314.
- [183] WEBER, A. Z., MENCH, M. M., MEYERS, J. P., ROSS, P. N., GOSTICK, J. T., LIU, Q. Redox flow batteries: a review. *J. Appl. Electrochem.*, 2011, 41, 1137–1164.
- [184] Electrical energy storage: white paper. Technical report. Prepared by electrical energy storage project team. International Electrotechnical Commission (IEC), Published December 2011. <http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf> [accessed 15.05.14].
- [185] FUJIHARA, T., IMANO, H., OSHIMA, K. Development of pump turbine for seawater pumped-storage power plant. *Hitachi Rev.*, 1998, 47, 199–202.
- [186] FLOWBATTERY (formerly Pnu Power). Compressed air batteries. n.d. <http://www.flowbattery.co.uk> [accessed 08.10.13].
- [187] HADJIPASCHALIS, I., POULLIKKAS, A., EFTHIMIOU, V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 2009, 13, 1513–1522.
- [188] PILLER power systems products. Energy storage. n.d. <http://www.piller.com/205/energy-storage> [accessed 12.06.14].
- [189] FARRET, F. A., SIMÕES, M. G. Integration of alternative sources of energy. John Wiley & Sons Inc., 2006, s. 262–300.
- [190] RASTLER, D. Electricity energy storage technology options: a white paper primer on applications, costs, and options. Electric Power Research Institute (EPRI), Technical report, Published December 2010.
- [191] US DEVELOPMENT OF ENERGY (DOE) global energy storage database. n.d. <http://www.energystorageexchange.org/projects> [accessed 16.06.14].
- [192] TWEED, K. UK launches Europe’s largest energy storage trial. *IEEE Spectrum*, Published 1st August 2013. <http://spectrum.ieee.org/energywise/energy/the-smarter-grid/uk-launches-europes-largest-energy-storage-trial> [accessed 04.05.14].
- [193] POULLIKKAS, A. A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renew. Sust. Energy Rev.*, 2013, 27, 778–788.
- [194] SHOENUNG, S. M. Characteristics and technologies for long- vs. short-term energy storage: a study by the DOE energy storage systems program. Technical report SAND2001-0765. Sandia National Laboratories, United States Department of Energy, Published March 2001.
- [195] GUSTAVSSON, J. Energy storage technology comparison. Bachelor of Science thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management, 2016.
- [196] WINTER, M., BRODD, R. J. What are batteries, fuel cells, and supercapacitors? *Chem. Rev.*, 2004, 104, 4245–70.
- [197] Energy storage technologies for wind power integration. Report. Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences Appliquées, Service BEAMS groupe Energie, ULB, Published March 2010. <http://en.escn.com.cn/download/show/125.aspx> [accessed 14.06.14].
- [198] Liquid air energy network forms in UK: focus on transportation and energy storage. Published May 2013. <http://www.greencarcongress.com/2013/05/laen-20130509.html> [accessed 30.05.14].
- [199] Electricity storage: technology brief. Technology Policy Brief, Energy Technology Systems Analysis Programme. International Renewable Energy Agency, Published April 2012. <http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20E18%20Electricity-Storage.pdf> [accessed 28.05.14].

- [200] RIES, G., NEUMUELLER, H.-W. Comparison of energy storage in flywheels and SMES. *Phys. C Supercond.*, 2001, 357–360, 1306–10.
- [201] BEACON POWER CORPORATION. Beacon power technology. Beacon Power Corporation, n.d. Dostupné z: <http://beaconpower.com/resources/> [cit. 2014-05-24].
- [202] SAN MARTÍN, J. I., ZAMORA, I., SAN MARTÍN, J. J., APERRIBAY, V., EGUÍA, P. Energy storage technologies for electric applications. *Int. Conf. on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11)*, 2011.
- [203] McDOWALL, J. Integrating energy storage with wind power in weak electricity grids. *J. Power Sources*, 2006, 162, s. 959–964.
- [204] FROST & SULLIVAN. Emerging energy storage technologies in Europe. Frost & Sullivan, 2003.
- [205] DU PASQUIER, A., PLITZ, I., MENOCA, S., AMATUCCI, G. A comparative study of Li-ion battery, supercapacitor and nonaqueous asymmetric hybrid devices for automotive applications. *J. Power Sources*, 2003, 115, s. 171–178.
- [206] SAFT BATTERIES. Energy storage & renewables overview, solutions and customer case studies. Saft Batteries, n.d. Dostupné z: <http://www.saftbatteries.com/market-solutions/energystorage-renewables> [cit. 2014-05-29].
- [207] BAROTE, L., WEISSBACH, R., TEODORESCU, R., MARINESCU, C., CIRSTEAN, M. Stand-alone wind system with vanadium redox battery energy storage. 2008 11th Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equip., IEEE, 2008, s. 407–412.
- [208] GONZALEZ, A., Ó'GALLACHÓIR, B., McKEOGH, E., LYNCH, K. Study of electricity storage technologies and their potential to address wind energy intermittency in Ireland. Final report. Sustainable Energy Research Group a Rockmount Capital Partners, Cork, RE/HC/03/001, 2004.
- [209] PRUDENT ENERGY VRB SYSTEMS. Gills Onions Project – Fact Sheet: 600 kW/3.6 MWh VRB energy storage system. Prudent Energy VRB Systems, n.d. Dostupné z: <http://www.pdenergy.com/pdfs/GillsOnionsProject-Fact%20Sheet042612-Final.pdf> [cit. 2014-05-23].
- [210] ELECTRIC FUEL LTD. Electric fuel introduces practical, zero-emission transportation. Electric Fuel Ltd., n.d. Dostupné z: <http://www.electric-fuel.com/evtech/ef-tech-brochure.pdf> [cit. 2014-06-16].
- [211] FUEL CELL TODAY. Construction of world's largest fuel cell park expected to commence in 2012. Fuel Cell Today, 2012. Dostupné z: <http://www.fuelcelltoday.com/news-archive/2012/october/construction-of-worlds-largest-fuel-cell-power-plant-expected-to-commence-in-2012> [cit. 2014-06-18].
- [212] INGRID 39 MWh grid-connected renewable energy storage project. *Fuel Cells Bull.*, 2012, 2012, s. 9.
- [213] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Solar Two demonstrates clean power for the future. Sun Lab produced U.S. Development of Energy, n.d. Dostupné z: <http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy97/22835.pdf> [cit. 2014-06-17].
- [214] UK DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY. Review of electrical energy storage technologies and systems and of their potential for the UK. DTI Report DG/DTI/00055/00/00, UK Department of Trade and Industry, 2004.
- [215] KAWAKAMI, N., IJIMA, Y., FUKUHARA, M., BANDO, M., SAKANAKA, Y., OGAWA, K. et al. Development and field experiences of stabilization system using 34 MW NAS batteries for a 51 MW wind farm. 2010 IEEE Int. Symp. Ind. Electron., IEEE, 2010, s. 2371–2376.
- [216] BECK, F., RÜETSCHI, P. Rechargeable batteries with aqueous electrolytes. *Electrochim. Acta*, 2000, 45, s. 2467–2482.
- [217] YAMAMURA, T., WU, X., OHTA, S., SHIRASAKI, K., SAKURABA, H., SATOH, I. et al. Vanadium solid-salt battery: solid state with two redox couples. *J. Power Sources*, 2011, 196, s. 4003–4011.
- [218] WEN, Z., CAO, J., GU, Z., XU, X., ZHANG, F., LIN, Z. Research on sodium sulfur battery for energy storage. *Solid State Ionics*, 2008, 179, s. 1697–1701.
- [219] ROSSI, A. E-Cat SK and long-range particle interactions. ResearchGate Preprint, 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.28382.48966/11.
- [220] ROSSI, A. Fluid Heater. US 9,115,913 B1, 2015.
- [221] GODES, R. E., COREIA, D. et al. Control of low energy nuclear reactions in hydrides, and autonomously controlled heat module. US 2022/0208339 A1, 2022.
- [222] STRATTON, J. A. Theory of Electromagnetic Field. SNTL, Prague, 1961.

- [223] KIKUCHI, H. *Electrohydrodynamics in Dusty and Dirty Plasmas: Gravito-Electrodynamics and EHD*. Springer, Dordrecht, 2001, 227 s. ISBN 0792368223.
- [224] ANSYS. ANSYS, 2025. Dostupné z: <https://www.ansys.com/>.
- [225] SHAN, F., TANG, F., CAO, L., FANG, G. Performance evaluations and applications of photovoltaic-thermal collectors and systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014, 33, s. 467–483. doi:10.1016/j.rser.2014.02.018.
- [226] QUINN, J. B., WALDMANN, T., RICHTER, K., KASPER, M., WOHLFAHRT-MEHRENS, M. Energy density of cylindrical Li-ion cells. *J. Electrochem. Soc.*, 2018, 165, s. A3284–A3291.
- [227] LIU, C., YU, Z., NEFF, D., ZHAMU, A., JANG, B. Z. Graphene-based supercapacitor with an ultrahigh energy density. *Nano Lett.*, 2010, 10, s. 4863–4868.
- [228] JIRKŮ, T., FIALA, P., KLUGE, M. Magnetic resonant harvesters and power management circuit for magnetic resonant harvesters. *Microsyst. Technol.*, 2010, 16, s. 677–690.
- [229] TOSHIBA ELECTRONIC DEVICES AND STORAGE CORPORATION. Power factor correction (PFC) circuits. Toshiba, Japan, 2019. Dostupné z: <https://toshiba.semicon-storage.com/>.
- [230] ANALOG DEVICES. LTC3109 – Auto-Polarity, Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager. Norwood, MA, Analog Devices Inc., 2021. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/ltc3109.html>.
- [231] LINEAR TECHNOLOGY. LT4320 – Ideal Diode Bridge Controller. Milpitas, CA, Linear Technology Corporation, 2014. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/lt4320.html>.