

Využití mikro-kogeneračních jednotek se Stirlingovým motorem pro KVET v rodinných domech

Bc. Karel Bělohávek, DiS.

Doc. Ing. Michal Kolovratník, CSc.

Abstrakt

Práce obsahuje přehled významných komerčně dostupných mikro-kogeneračních technologií využívajících Stirlingův motor. Podrobněji se zabývá systémy se Stirlingovým motorem s volnými písty, který používá u svých zařízení řada evropských výrobců tepelné techniky. Dále pro zvolený objekt, kterým je rodinný dům nebo byt s běžným technickým vybavením, stanovuje jednotlivé potřeby energií a následně analyzuje možnosti jejich pokrytí pomocí mikro-kogeneračního zařízení.

Klíčová slova

Decentralizovaná energetika, mikro-kogenerace, Stirlingův motor, energetická náročnost budov.

1. Úvod

Decentralizované zdroje energie jsou v energetice velmi diskutovaným pojmem. Hlavní úloha těchto technických zařízení spočívá v přesunutí výroby energie, zvláště elektřiny, blíže ke konečným spotřebitelům. Hlavní výhodou je eliminace ztrát způsobených přenosem energií a lepší možnost využití zdrojů s malou hustotou energie, zvláště OZE. Výroba elektřiny i tepla se tudíž musí řešit i na nejnižší úrovni, jako jsou bytové nebo rodinné domy. V současné době se tímto způsobem vyrábí teplo pro vytápění nebo přípravu teplé užitkové vody. Nejčastěji je teplo získáno spalováním tuhých nebo plyných paliv, z dalších způsobů lze jmenovat tepelná čerpadla nebo solární kolektory. Vlastní výrobu elektřiny lze realizovat např. pomocí fotovoltaických panelů. Vedle tolik diskutované fotovoltaiky existují i jiná řešení decentralizované výroby elektřiny. Jedním z těchto systémů je kogenerace, tzn. kombinovaná výroba elektrické energie a tepla, která je známá také pod označením KVET. Vedoucí technologií, která se v kogeneraci využívá, je spalovací plynový motor. Pro malá zařízení je však výhodné, použít i jiné technologie. Často se mluví o motorech s vnitřním přívodem tepla, kterými jsou Stirlingův motor a ORC. Z chemických zdrojů lze jmenovat palivové články, které však dosud nejsou komerčně dostupné. Stirlingův motor má velké množství výhod pro tyto aplikace. Narozdíl od běžného plynového spalovacího motoru lze mnohem lépe řídit spalování z důvodu již zmíněného vnějšího přívodu tepla. Elektrický výkon motorů lze také mnohem lépe regulovat. Velmi zajímavé je využití Stirlingových motorů s volnými písty vyvinutých v USA společností Sunpower, Inc. (od prosince 2012 vlastněn jinou americkou společností společností Ametek Lnc.). Tyto motory, vyráběné převážně pro chladicí a kryogenní techniku, se dají realizovat i pro velmi malé výkony.

Práce si klade za cíl podat stručný přehled o komerčně dostupných mikro-kogeneračních systémech využívajících Stirlingův motor a jednoduchou úvahou analyzovat optimální podmínky nasazení těchto zařízení v rodinných domech.

2. Definice pojmu mikro-kogenerace

Pojem mikro-kogenerace definuje evropská směrnice 2004/8/ES jako kogenerační zařízení s maximálním elektrickým výkonem 50 kWe. Tento rozsah je však velmi široký a je vhodné ho dále dělit na menší části. V praxi se pojmem "mikro" často označují zařízení s max. výkonem pouze 3 až 5 kWe a zbytek rozsahu je označován pojmem mini-kogenerace. Je nutné si uvědomit, že na tuto problematiku nelze nahlížet pouze z hlediska elektrických výkonů jednotlivých zařízení, ale též z hlediska různých energetických potřeb objektů. Běžné použití kogenerace s jednotkami na zemní plyn uvažuje stálou konstantní potřebu tepla, např. pro přípravu TUV, a kontinuální výrobu elektřiny s dodávkou do sítě v určitém nasmlouvaném tarifu. Za objekty, kde je velký potenciál kogenerace, se považují hotely, objekty s bazény, skleníky atp. Tento přístup se využívá již řadu let. Jako příklad lze zmínit italskou jednotku TOTEM 15 kWe ze 70. let využívající motor z automobilu Fiat 127 nebo první jednotku MT 22 českého výrobce TEDOM z roku 1992, která využívala motor Škoda Favorit. Mikro-kogenerace však bývá hlavně skloňována v souvislosti s masivním nasazením KJ v rodinných domech nebo samostatných bytových jednotkách. Tyto objekty jsou však, narozdíl od specifických objektů popsaných výše, charakteristické svou spotřebou energií, která je malá s časově velmi nerovnoměrným průběhem. Z tohoto důvodu jsou potřeba zařízení malých výkonů se specifickými vlastnostmi, které mohou splňovat právě jednotky se Stirlingovým motorem.

3. Základní údaje mikro-kogeneračních jednotek

3.1 Specifikace mikro-kogeneračních jednotek

Pro hodnocení provozu mikro-kogeneračních jednotek se používají stejné veličiny jako u běžné kogenerace. Výrobci zařízení nejčastěji udávají jako hlavní parametry elektrický výkon P a tepelný výkon \dot{Q} . Dalším významným parametrem je celková účinnost η_c , označována též jako využití paliva z důvodu sporného určení celkového výkonu jako součtu vyrobené elektřiny a tepla, ze které je možno určit příkon jednotky. Tato hodnota, obsažená ve specifikaci výrobku, je však pouze teoretická, jelikož je měřena na zkušebně při ideálních podmínkách. Pokud je např. jednotka provozována na menším výkonu, než je výkon jmenovitý, celková účinnost klesá. Účinnost také klesá, pokud se nevyužije část vyrobeného tepla. Podrobněji se touto problematikou zabývají další kapitoly. Pro objektivní hodnocení provozu je tedy nutné určit z provozních testů průměrnou účinnost za určité období, obvykle jeden rok, při skutečných podmínkách. Dalšími udávanými parametry jsou elektrická účinnost η_e a tepelná účinnost η_q , které udávají příspěvek vyrobené elektřiny (popř. tepla) z celkového příkonu jednotky \dot{Q}_c . Důležitým parametrem je modul teplárenské výroby e , který je definován jako podíl P a \dot{Q} (popř. η_e a η_q). Tento koeficient je v mikro-kogeneraci významný při konkrétním návrhu systému, kdy se musí regulovat jeho optimální hodnota z hlediska okamžitých potřeb jednotlivých výkonů. Vzájemný přepočítání výše uvedených veličin znázorňují vztahy (1) a (2).

$$\dot{Q}_p = \frac{P + \dot{Q}}{\eta_c} = \frac{P}{\eta_e} = \frac{\dot{Q}}{\eta_q} \quad (1)$$

$$e = \frac{P}{\dot{Q}} = \frac{\eta_e}{\eta_q} \quad (2)$$

3.2 Ceny energií

Pro převedení množství vyrobené energie do finančního vyjádření je třeba vycházet z aktuálních cen energií (elektřina, plyn) s případnou úvahou dalšího vývoje cen v dalších letech. V této práci jsou použity ceníky RWE [10] (zemní plyn) a ČEZ [11] (elektřina) v rozmezí let 2009 až 2013.

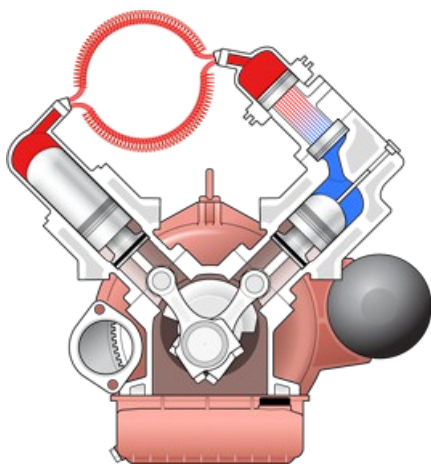
Při výpočtu celkové spotřeby plynových kogeneračních jednotek je nutné vzít v úvahu, že v ceníku plynu je obsah energie v 1 m³ vztažen ke spalnému teplu Q_s , zatímco většina výrobců vztahuje účinnosti jednotky k výhřevnosti paliva Q_i , která je větší. Jednotlivé účinnosti lze přepočítat podle vztahu (3).

$$\eta_{ci} = \frac{Q_s}{Q_i} \cdot \eta_{cs} = 1,11 \cdot \eta_{cs} \quad (3)$$

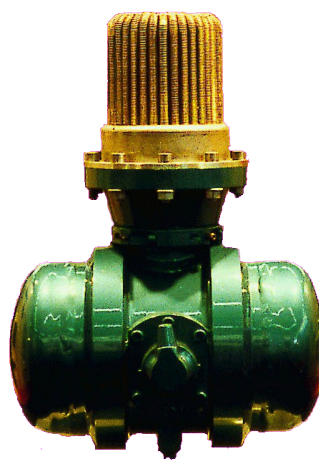
4. Komerční dostupnost jednotek

4.1 Všeobecný přehled

Stirlingův motor má díky svému principu vnějšího přívodu tepla velké výhody pro použití v kogeneračních jednotkách. Hlavní výhody jsou lepší řízení spalování a možnost využívat pevná paliva. Nevýhoda je však určitá konstrukční a výrobní složitost, ze které vyplývá vysoká cena tohoto stroje. Stirlingovy motory se obecně dělí podle modifikací (označují se zpravidla alfa, beta a gama), které se liší ve způsobu činnosti motoru. Modifikace alfa využívá dva pracovní písty, beta a gama využívá jeden pracovní a jeden pomocný píst, přičemž u modifikace beta jsou tyto písty umístěny v jedné ose. V mikro-kogeneraci se využívají všechny tři zmíněné typy, popř. jejich speciální varianty. Známý motor typu alfa (aplikace pro jednotky o výkonu 9 kWe) je SOLO 161 vyvinutý švédskou společností United Stirling. Tento motor je použit např. v jednotkách s názvy CleanGen nebo SOLO Stirling. Známá je též aplikace v solární energetice. Motor podobné konstrukce neúspěšně vyvíjela také česká společnost TEDOM. Speciální variantou tohoto typu je čtyřválcový motor, označovaný také jako FCDA (Four cylinder double acting), který je využit např. u silnějších jednotek Stirling Denmark 35 kWe a Stirling Biopower 38 kWe. V uvažované výkonové oblasti do 1 kWe je velmi známá jednotka Whispergen od společnosti WhisperTech.



Obr. 1. Stirling SOLO 161[5].

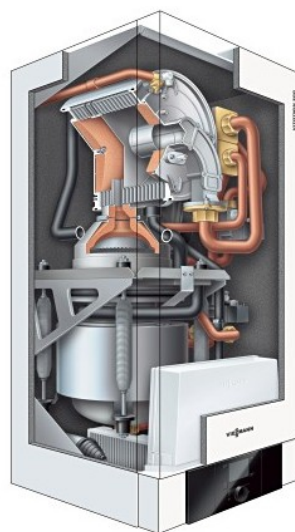


Obr. 2. Motor Sigma PCP 75[6].

Motor modifikace beta označený SCP 75 o výkonu 3 kWe využívala ve svých jednotkách norská společnost Sigma Elektroteknisk. Historický vývoj tohoto stroje směřuje, podobně jako u SOLO 161, do Švédska (jednotka PCP 75). Není bez zajímavosti, že tento motor vyráběly v Německu společnosti Bomin Solar a Ecker, přičemž se objevil také na propagačním plakátu společnosti Sunmachine. Velmi zajímavý experiment s motorem beta provedl výrobce tepelné techniky HOVAL, který je svému vyráběnému kotli 25 kW na dřevo přidal externí Stirlingův motor o výkonu 1 kWe. Velký význam v mikro-kogeneraci do výkonu 1 kWe má speciální varianta tohoto motoru s volnými písty, kterou podrobněji rozebírá následující kapitola. Typ gama využívala ve svých strojích již zmíněná německá společnost Sunmachine, která vyráběla, vedle zařízení na zemní plyn, také jednotky pro spalování dřevěných pelet. Motor využívaný Sunmachine vývojově navazuje na experimentální motor s názvem ST05, který byl představen již r. 1992 německým konstruktérem Dietrem Viebachem.



Obr. 2. Řez jednotkou Sunmachine [6].



Obr. 3. Jednotka Viessmann Vitotwin s FPSE společnosti Microgen [8].

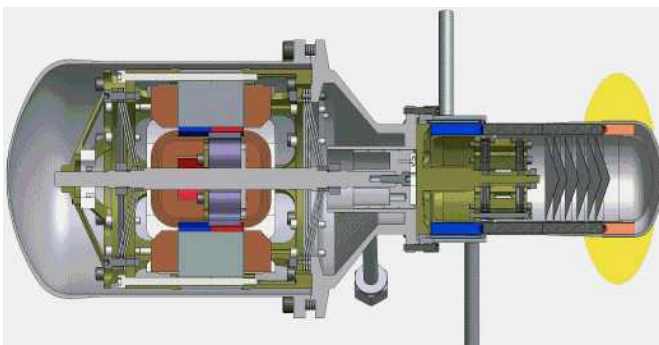
4.2 Jednotky s motorem s volnými písty

Stirlingův motor s volnými písty, označovaný jako FPSE nebo LFPSE (Linear Free Piston Stirling Engine), je speciální konstrukcí, u které nejsou jednotlivé písty pevně kinematicky spojeny. V mikro-kogeneraci se využívají FPSE modifikace beta s lineárním elektrickým generátorem. Celý motor tvoří, stejně jako u většiny využívaných typů, s generátorem hermeticky uzavřený komplet s heliem jako pracovní látkou. Za vynálezce FPSE je považován Williame Beale (jeho vynález je datován od r. 1964, patentován byl 1971 [3]), který následně r. 1974 založil společnost Sunpower, současného lídra ve výrobě těchto strojů, využívaných převážně v kryogenní technice. Z konstrukce, vyvinuté společností Sunpower, vychází motor, který vyrábí pro mikro-kogenerační zařízení holandská společnost Microgen. Microgen Stirling je součástí komerčně dostupných zařízení, které v současné době nabízejí přední evropští prodejci tepelné techniky (např. Baxi a Viessmann). S motorem experimentoval též Vaillant, který však r. 2011 představil jednotku Ecopower 1 o výkonu 1 kWe se spalovacím motorem Honda.

Dalším, v kogeneraci již méně úspěšnými typem FPSE, je motor společnosti Infinia (dříve známé pod názvem Stirling Technology Campeny - STC), který je využíván převážně v solární energetice. Od Sunpoweru se liší vnitřním provedením bezkontaktní vazby pístů a konstrukčním provedením lineárního alternátoru [4]. Odlišnosti obou motorů jsou patrné z obr. (4) a (5). S prototypy jednotek využívající tento motor experimentovaly společnosti Buderus (Bosch Thermotechnik), Enatek (v současné době s již nefunkční webovou prezentací) a japonský Rinnai.



Obr. 5. Motor FPSE Microgen [8].



Obr. 6. Motor FPSE konstrukce Infinia [7].

4.3 Porovnání vybraných typů kogeneračních jednotek

Přehled vybraných kogeneračních jednotek se Stirlingovým motorem ukazuje tabulka 1. Velmi zajímavé je porovnání s dalšími jednotkami, které využívají rozdílné technologie. Jednotky se spalovacím motorem pracují s mnohem vyšším teplotenským modulem e . Tento fakt předpokládá využití dalšího zdroje tepla pro pokrytí ostatní tepelné spotřeby. Technologie s parním strojem, která je dostupná pod názvem OTAG, má naopak velmi malý součinitel e , což může být velmi nevýhodné při menší tepelné spotřebě objektu. Výhoda jednotek s FPSE je v kompaktním provedení s doplňkovým zdrojem tepla, kterým jde modul e regulovat, a zejména v použití kondenzační technologie pro využití latentního tepla spalin.

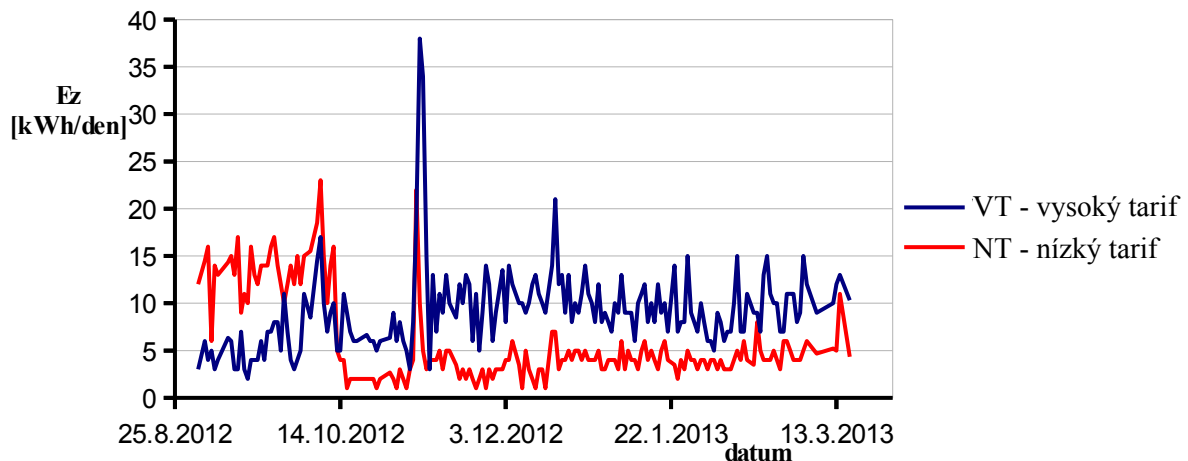
Tabulka 1. – Porovnání vybraných jednotek se Stirlingovým motorem a dvou jednotek s odlišnou technologií [1] [5].

Jednotka	Motor	P	Q	η_c	e
		[kWe]	[kWt]	[%]	[-]
CleanGen	SOLO 161	2 až 9	8 až 25	do 95	0,25 až 0,36
Sunmachine	Sunmachine	1,5 až 3	4,5 až 10,5	90	0,33 až 0,28
Whispergen	Whispergen	do 1	7	92 až 94	0,14
Dachs Stirling	Microgen	do 1	6	97 (Q_s)	0,16
EcoGen Brötje	Microgen	0,3 až 1	5	92	0,2
Konkureční technologie (parní stroj, spalovací motor)					
OTAG	OTAG	0,3 až 2	3,5 až 16	94	0,08 až 0,125
Vaillant Ecopower 1	Honda	1	2,5	92	0,4

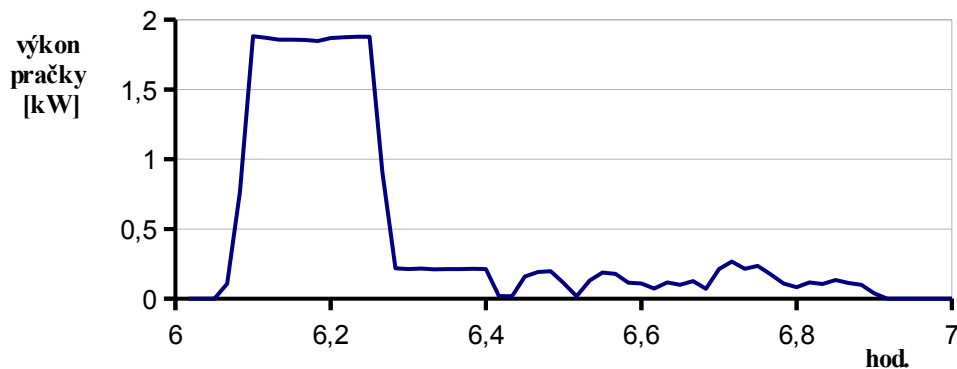
5. Analýza provozu mikro-kogenerační jednotky v rodinném domě

5.1 Spotřeba energií charakteristické pro rodinné domy

Rodinné domy nebo byty jsou velmi specifické z hlediska energetické náročnosti. Většina tepla se v těchto objektech spotřebuje pro vytápění a v menší míře pro přípravu TUV. Teplo pro vytápění je závislé na dvou hlavních faktorech. Prvním, který určuje celkovou hodnotu spotřeby, je tepelná ztráta objektu, která je určena zejména jeho konstrukcí. Je pravděpodobné, že nový rodinný dům bude mít menší spotřebu tepla než dům starý 20 let. V úvahu se musí vzít také současný trend zateplování starých objektů, který tepelnou ztrátu výrazně snižuje. Druhým vlivem, který udává průběh této spotřeby, jsou venkovní podmínky. Ty jsou teoreticky dány normalizovanou křivkou trvání venkovní teplot. Spotřeba TUV je závislá zejména na počtu osob, které objekt užívají. Rozdílná situace však nastává u spotřeby elektřiny, jejíž hodnota je závislá zejména na vybavení objektu a zejména na chování obyvatel. Průběh spotřeby elektřiny je velmi nerovnoměrný. Obr. 7 ukazuje příklad průběhu denních průměrných hodnot během části roku dvougeneračního rodinného domu s distribuční sazbou D025d ve vysokém a nízkém tarifu. Z pohledu provozu mikro-kogeneračního zařízení má však větší význam průběh spotřeby elektřiny v průběhu dne, který je velmi nevyrovnaný. Velkým problémem jsou spotřebiče s velkým výkonem cca 2 až 3 kW, které jsou v různý čas provozovány pouze několik málo minut. Takovými spotřebiči jsou např. pračka, mikrovlnná trouba, varná konvice atd. Příklad průběhu výkonu takového spotřebiče, konkrétně automatické pračky, je zobrazen na obr. 8.



Obr. 7. Průběh spotřeby elektřiny v rodinném domě ve vysokém a nízkém tarifu.



Obr. 8. Příklad nevyrovnaného průběhu výkonu el. spotřebiče – pračky (okamžitý výkon byl snímán po minutách provozu).

5.2 Použitá metoda hodnocení KVET

Pro vlastní hodnocení mikro-kogeneračního provozu byla zvolena velmi jednoduchá a názorná metoda. Úvaha spočívá ve stanovení základní finanční úspory, která se určí jako rozdíl v cenách nakupovaných energií před a po nasazení KVET. Z této základní úspory se následně získá celková úspora připočtením ceny za prodej přebytku elektřiny a odečtením ročních provozních nákladů RPN. Následně je z uvažované ceny jednotky stanovena doba návratnosti a porovnává s předpokládanou životností.

5.3 Odvození vztahu pro základní finanční úsporu

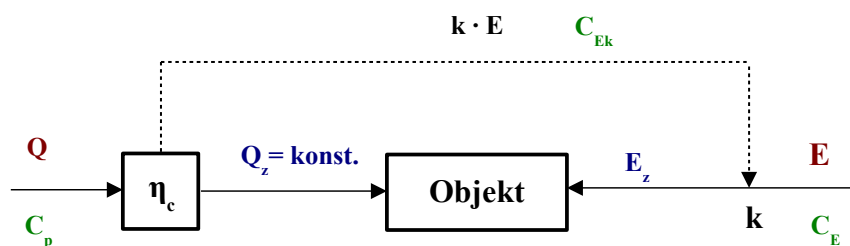
Prvním krokem odvození je určit, jaké množství vlastní spotřeby elektřiny lze vyrobit kogenerační jednotkou. Je nutné si uvědomit, že z technických důvodů není možné jednotkou o jmenovitém výkonu 1 kWe, pokrýt celou vlastní spotřebu elektřiny z důvodu provozu spotřebičů o vyšších jmenovitých výkonech. Další faktor, který snižuje podíl vyrobené elektřiny na celkové spotřebě, je nemožnost nasazení kogenerace v letním období, kdy je velmi malá potřeba tepla.

Ve vlastním hodnocení je tato skutečnost respektována zavedením součinitele vlastní spotřeby k , který následně ve výpočtu vystupuje jako volitelný parametr. Jelikož je k závislý na mnoha faktorech (např. skutečná spotřeba energií, průběhy energií, délka topného období atd.), lze jeho hodnotu přesně stanovit až z výsledného hodnocení skutečného provozu.

Množství vyrobené elektřiny pro vlastní spotřebu se určí ze základní spotřeby ze vztahu (4).

$$E = (1 - k) \cdot E_z \quad (4)$$

Druhým krokem je stanovení ceny vyrobené elektřiny. Schéma kogeneračního systému je zobrazeno na obr. 9. Cena vyrobené elektřiny je následně definována vztahem (5) jako podíl ceny plynu a celkové účinnosti. Pokud se do tohoto vztahu místo ceny C_{Ek} dosadí nákupní cena C_E , vyjde minimální účinnost, při které je elektřina teoreticky vyrobena za stejnou cenu jako nakoupena.



Obr. 9. Schéma charakterizující kogenerační systém.

$$C_{Ek} = \frac{C_p}{\eta_c} \quad (5)$$

Ze vztahu (5) je patrné, že cena vyrobené elektřiny je závislá, vedle ceny plynu, o které bude pojednáno dále, také na celkové účinnosti. Ta je, jak již bylo zmíněno na začátku práce, rovna průměrné celkové účinnosti zařízení za určité provozované období. Je nutné si uvědomit, že výrobci udávají maximální možnou účinnost zjištěnou na zkušebně. V provozu se však hodnoty mohou výrazně lišit. Např. jednotka s motorem Microgen má udanou hodnotu účinnosti 97 %. Tato hodnota je vztažena ke spalnému teplu zemního plynu. Pokud se tento údaj dosadí do vztahu (3), vyjde hodnota účinnosti vztažená k výhřevnosti 107,7 %. To znamená, že je využito zařízení pro kondenzaci spalin, které však nelze efektivně využít v průběhu celého roku. Účinnost je obvykle také závislá na provozních podmínkách, při kterých je jednotka provozována na menší výkon. Ve vlastním energetickém hodnocení je tedy lepší uvažovat menší hodnotu účinnosti nebo, jak je provedeno v této práci, provést výpočet pro několik variant.

Třetím krokem je určení vlastní finanční úspory, která je definována vztahem (6). Není bez zajímavosti, že na tuto úsporu nemá přímý vliv velikost základní spotřeby plynu. Je však nutné splnit podmínku nevyrábět teplo, pokud není pro něj využití. Základní spotřeba plynu tudíž vystupuje ve výpočtu jako konstanta.

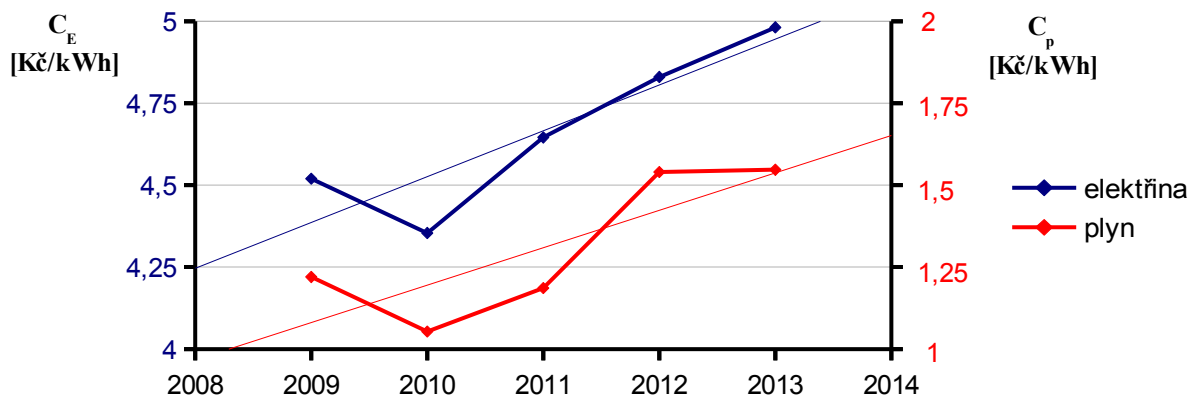
$$\Delta C = k \cdot E_z \cdot \left(C_E - \frac{C_P}{\eta_c} \right) \quad (6)$$

5.4 Nákupní ceny energie

Z předchozího vztahu je zřejmé, že takto definovanou finanční úsporu velmi ovlivňují nákupní ceny energií. Tyto ceny při podrobnějším řešení nelze uvažovat konstantní, ale je nutné zvážit i budoucí vývoj cen. Ceny od r. 2009 do r. 2013 pro distribuční sazbu plynu 20 až 25 MW a sazby elektřiny D02d a D25d je uveden v tabulce 2. Grafické znázornění průběhu cen plynu a elektřiny v sazbě D02d ukazuje obr. 10.

Tabulka 2. – Přehled cen elektřiny a plynu mezi lety 2009 a 2013.

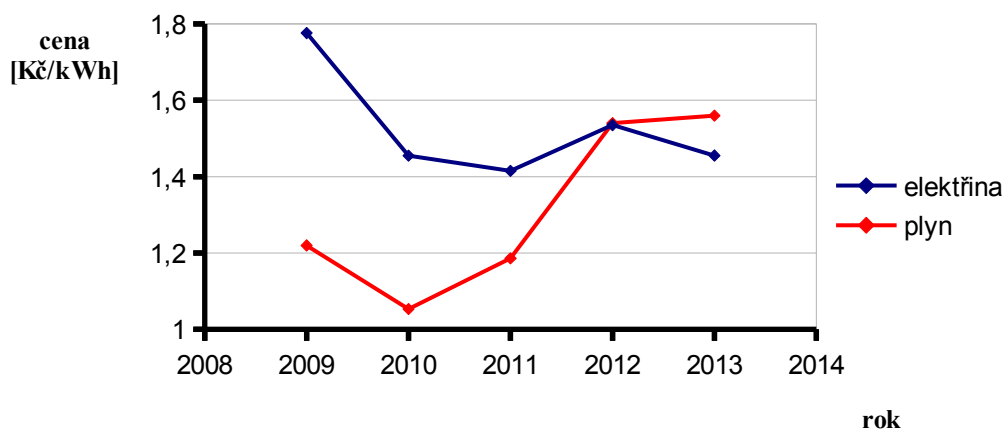
	Plyn	Elektřina			Poměr ceny plynu a elektřiny		
	20 až 25 [Kč/kWh]	D02d VT [Kč/kWh]	D25d VT [Kč/kWh]	D25d NT [Kč/kWh]	D02d VT [-]	D25d VT [-]	D25d NT [-]
2009	1,220	4,520	5,074	1,763	0,27 (3,71)	0,24 (4,16)	0,69 (1,45)
2010	1,053	4,354	4,957	1,621	0,24 (4,13)	0,21 (4,71)	0,65 (1,54)
2011	1,186	4,645	5,210	1,865	0,26 (3,92)	0,23 (4,39)	0,64 (1,57)
2012	1,540	4,830	5,403	2,042	0,32 (3,14)	0,29 (3,51)	0,75 (1,33)
2013	1,560	4,981	5,470	2,194	0,31 (3,19)	0,29 (3,51)	0,71 (1,41)
	C_p	C_E			C_P / C_E (C_E / C_P)		



Obr. 10. Vývoj celkových cen plynu a elektřiny pro domácnost od r. 2009.

5.5 Přebytek vyrobené elektřiny

Po stanovení základní finanční úspory je třeba zvážit, jak efektivně využít přebytek elektřiny. Je zřejmé, že z důvodu velmi nevyrovnaného průběhu spotřeby elektřiny během dne nebude možno se tomuto přebytku vyhnout. Jednou z možností je prodej elektřiny do veřejné distribuční sítě. Problém je však s výkupní cenou přebytku. U mikro-kogeneračních jednotek je předpoklad nerovnoměrného provozu, z kterého nelze přesně určit jeho velikost. Je však zřejmé, že cena nepřesáhne nákupní cenu silové elektřiny. Na obr. 11 je porovnání ceny plynu pro koncového zákazníka a cena nakoupené silové elektřiny. Z grafu je patrné, že v současné době je plyn dražší než silová elektřina.



Obr. 11. Vzájemné porovnání vývoje konečné ceny plynu pro domácnost a ceny silové elektřiny.

Způsob, jak zvýšit výkupní cenu elektřiny, je využití příspěvku na kogeneraci, který stanovuje Energetický regulační úřad - ERÚ. Tento příspěvek lze uplatnit i na elektřinu vyrobenou pro vlastní spotřebu. Příspěvek je nově (od 1. 1. 2013) stanoven pro výrobky od 0 do 200 kWe podle ročních provozních hodin. Před tímto datem byl definován pro rozsah do 1 MWe podle denního tarifu 8, 12 a 24 h. Z takto definovaných podmínek, které určují kolik energie, a kdy se musí vyrobit, vyplývá, že jsou koncipovány spíše pro zařízení s rovnoměrným provozem, tzn. v objektech se specifickou potřebou tepla, jak bylo zmíněno v 2. kapitole.

Tabulka 3. – Hodnoty příplatků za kogeneraci, jak jsou uvedeny v cenovém rozhodnutí ERÚ.

Instalovaný výkon výrobný [kW]		Provozní hodiny [h/rok]	Zelené bonusy [Kč/MWh]
od	do (včetně)		
0	200	3 000	2 010
		4 400	1 540
		8 400	670

Pokud je elektřina prodávána, musí být splněny i některé legislativní požadavky. Nutná je zejména licence na výrobu elektřiny a registrace u operátora trhu s elektřinou - OTE. Množství vyrobené elektřiny je nutno pravidelně vykazovat a platit dokonce určité složky ceny za elektřinu vyrobenou pro vlastní spotřebu.

5.6 Roční provozní náklady RPN

U kogeneračních jednotek jsou provozní náklady určovány podle hodin, kdy je jednotka v provozu, tzv. motohodin. Vlastní servis a údržba jsou poté určeny výrobcem v různých intervalech. Bohužel není mnoho dostupných informací o servisních nákladech kogeneračních jednotek využívajících nové technologie. Vyšší náklady je třeba předpokládat u klasického spalovacího motoru z důvodu velkého množství rotačních součástí. Nejmenší náklady lze např. uvažovat u mikroturbin, které však nejsou dostupné pro uvažované výkony. V této souvislosti lze zmínit některé technologie s Stirlingovým motorem. Jednotky využívající FPSE mají výhodu naprosté absence rotačních částí, z čehož lze předpokládat i menší provozní náklady. Jednotka Whispergen s technologií FCDA převádí lineární pohyb všech čtyř pístů poměrně složitým mechanismem na otáčivý pohyb. Z tohoto důvodu lze u této jednotky předpokládat vyšší provozní náklady i poruchovost.

5.7 Cena kogeneračních jednotek

Ceny mikro-kogeneračních jednotek lze dohledat v různých zdrojích. Např. [2] uvádí cenu malé jednotky o výkonu 1 KWe se Stirlingovým motorem od 10 000 až 12 000,- EUR. Další příklady cen, včetně specifikací od výrobců, lze dohledat na německých webových stránkách [www. bhkw-prinz.de](http://www.bhkw-prinz.de) [5]. Cena je často udávána včetně dalších zařízení, jako je akumulátor tepla, popř. přídavný plynový kotel, pokud již není interní součástí jednotek.

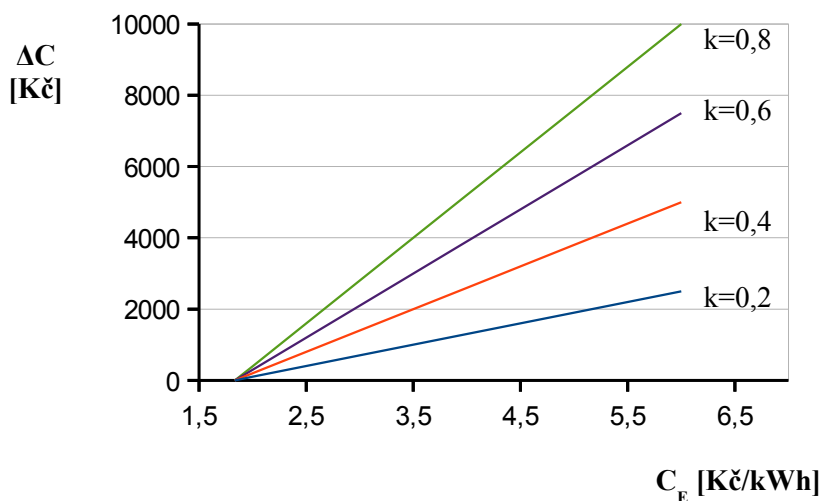
5.8 Analýza konkrétního případu nasazení mikro-kogenerace

Po analýze parametrů objektu a zjištění všech potřebných provozních údajů kogeneračních jednotek lze přistoupit k vlastnímu hodnocení, které je pro názornost provedeno se značným zjednodušením. Výpočet je proveden pro objekt se spotřebou elektřiny 3 MW/rok ve vysokém tarifu distribuční sazby D02d. Spotřeba plynu, která však na úsporu nemá vliv, je z důvodu stanovení konečné ceny brána v rozsahu 20 až 25 MW.

Prvním krokem výpočtu je stanovení finanční úspory definované vztahem (6). Výsledné hodnoty pro různé parametry ukazuje tabulka 4. Graf na obr. 12 zobrazuje závislost finanční úspory na nákupní ceně elektřiny pro definovaný objekt.

Tabulka 4. – Vypočtené hodnoty finanční úspory ΔC v závislosti na parametrech k a η_c .

k [-]	ΔC [Kč]				
	0,2	1 740,9	1 818,9	1 887,7	1 948,8
0,4	3 481,8	3 637,7	3 775,4	3 897,7	4 007,1
0,6	5 222,6	5 456,6	5 663	5 846,5	6 010,7
0,8	6 963,5	7 275,5	7 550,7	7 795,4	8 014,3
η_c [-]	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95



Obr. 12. Závislost finanční úspory na změně nákupní ceny elektřiny při různých parametrech k při základní spotřebě elektřiny 3 Mwh/rok.

Druhým hodnocení je určení prosté návratnosti, která se určí ze vztahu (7) z vlastní ceny jednotky a celkové finanční úspory ΔC_c , která je součtem základní úspory, vypočtené v tabulce 4, a ceny prodané elektřiny, od kterého jsou odečteny roční provozní náklady RPN . Cena prodané elektřiny C_d je součet tržní ceny za elektřinu a příspěvku na KVET, od kterého jsou odečteny legislativní poplatky související s vlastní spotřebou, pokud nejsou již odečteny v průběhu výpočtu od z ceny elektřiny C_E . Doba návratnosti je následně porovnávána s předpokládanou životností kogenerační jednotky, která je udávána 20 až 30 let.

$$D = \frac{C_j}{\Delta C_c} \quad (7)$$

$$\Delta C_c = \Delta C + C_d - RPN \quad (8)$$

Tabulka 5. – Vypočtené hodnoty doby návratnosti v závislosti na celkové finanční úspoře a ceně jednotky.

ΔC_c [Kč/rok]	D [rok]		
2 000	150	100	50
4 000	75	50	25
6 000	50	33,3	16,7
8 000	37,5	25	12,5
10 000	30	20	10
C_j [Kč]	300 000	200 000	100 000

Z výsledků obsažených v tabulce 5 je patrné, že uvažovaná návratnost je závislá zejména na ceně jednotky. Pokud je cena uvažována v hladině od 10 000,- EUR, tzn. cca 250 000,- Kč, bude návratnost minimálně 25 let při uvažované maximální úspoře 10 000,- Kč za rok. Tato hodnota je na hranici životnosti zařízení. Dle tabulky 4 je úspora pro vlastní spotřebu uvažovaného objektu reálná maximálně do 6 000,- Kč. V této hladině se návratnosti pohybují kolem cca 40 let. Tyto hodnoty potvrzují současnou nekonkurenceschopnost těchto zařízení nasazených v podmínkách České republiky.

5.9 Hodnocení analýzy provozu

Z výsledku výpočtu je patrné, že výsledná doba návratnosti je příliš vysoká a je tudíž nutné ji snížit. Logickým postupem dle vztahů (6), (7) a (8) lze určit faktory, které dobu návratnosti snižují:

- Snížení ceny jednotky
- Zvýšení celkové finanční úspory
 - Snížení provozních nákladů
 - Zvýšení výkupní ceny elektřiny
 - Zvýšení množství dodané elektřiny do sítě
 - Snížení ceny plynu, zvýšení ceny elektřiny
 - Zvýšení spotřeby elektřiny
 - Zvýšení účinnosti jednotek
 - Zvýšení koeficientu vlastní spotřeby

Snížení ceny jednotek je nutné pro snížení návratnosti. Současná vysoká cena je hlavní faktor, který velmi snižuje konkurenceschopnost těchto zařízení. Dle tabulky 5 je nutné tuto cenu snížit alespoň na úroveň 100 000 až 150 000 Kč. Lze předpokládat, že k určitému snížení dojde vlivem větší dostupnosti jednotek, která bude umožněna dlouhodobým vývojem určité technologie, např. FPSE. Další možnost je využití nových levnějších technologií, kde se ovšem musí opět předpokládat dlouhodobý vývoj s nejistým výsledkem spojený s velkými náklady.

Snížení provozních nákladů je závislé zejména na použité technologii. Velmi náročné na provoz jsou např. jednotky se spalovacími motory. Malou náročnost lze naopak předpokládat u mikroturbín, které však nejsou dostupné pro uvažované výkony. Jednotky s technologií FPSE mají velkou výhodou v absenci rotačních částí, z čehož lze též předpokládat menší provozní náklady.

Zvýšení výkupní ceny elektřiny může být způsobeno zvýšením tržní ceny silové elektřiny (tzn. velmi negativní vliv pro konečného uživatele) nebo zvýšením takzvaných zelených bonusů,

což určitě není optimální řešení. Každopádně je nutné optimálně přizpůsobit legislativní podmínky pro provoz těchto zařízení.

S případným zvýšením výkupní ceny elektřiny lze také uvažovat o zvýšení množství vyrobené elektřiny dodané do distribuční sítě. To je však možné, pokud je v objektu velká potřeba tepla.

U obou předchozích případů je vhodné najít uplatnění pro vyrobenou elektřinu. Moderní způsob uvažuje např. s využitím tzv. virtuálních elektráren, což znamená více malých výroben elektřiny, které se navenek chovají jako jeden zdroj.

Nákupní ceny elektřiny a plynu mají výrazný vliv na dobu návratnosti. Problémem je zejména vysoká cena plynu, která výrazně snižuje finanční úsporu. Růst konečné ceny elektřiny, který naopak úsporu zvyšuje, je však v současné době uměle způsoben příspěvkem na podporu výroby elektřiny. Z grafu na obr. 10 je patrné, že obě ceny mají v posledních letech stoupavý trend.

Zvýšení spotřeby elektřiny lze provést instalací náročnějších spotřebičů do objektu. To je v době, kdy se všude hledají úspory, celkem úsměvné. Je však pravděpodobné, že u energetiky náročnějších rodinných domů bude finanční úspora z provozu kogenerace větší.

Hlavní potenciál zvýšení celkové účinnosti kogeneračních systémů je v optimalizaci provozních parametrů kogeneračního systému. Významné je zejména nasazení kondenzačních technologií, které umožňují využití latentního tepla obsaženého ve spalinách.

Posledním uvažovaným faktorem, kterým lze zvýšit finanční úsporu, je zvýšení koeficientu vlastní spotřeby k . V předchozích výpočtech vystupoval tento koeficient jako parametr nabývající hodnoty od 0,2 do 0,8. Ve skutečnosti je tento faktor ovlivněn denním průběhem spotřeby elektřiny a způsobem regulace výroby elektřiny v kogenerační jednotce. Zvýšit ho lze tzv. řízením spotřeby, což znamená zapínat některé spotřebiče v určitý čas a vyrovnávat tím nerovnoměrný průběh. Řízení výroby v různých výrobnách (např. zmíněné virtuální elektrárny) a zároveň spotřeby elektřiny je principem systémů SMART-GRID.

6. Závěr

Práce podává přehled o komerčně dostupných jednotkách využívající Stirlingův motor. Hluběji se zabývá zařízeními se speciální variantou tohoto motoru tzv. FPSE, které jsou zajímavé z hlediska dlouhodobého a kvalitního vývoje těchto motorů, od kterého lze v budoucnu předpokládat nižší cenu těchto zařízení. Bohužel však v současné době není mnoho relevantních informací o provozních vlastnostech těchto zařízení. Nejlepší způsob ověření parametrů je zřejmě nezávislý provozní test na zařízení instalovaném ve skutečných podmínkách, např. v objektu s přibližnými parametry dle této práce.

Vlastní hodnocení je provedeno velmi zjednodušeně pro vzorový objekt. Z hodnocení jsou zřejmé hlavní nevýhody nasazení mikro-kogenerace v podmínkách ČR.

- vysoká cena jednotek
- vysoká nákupní cena plynu
- nevhodné a nestálé legislativní podmínky pro provoz těchto zařízení

V každém případě může být mikro-kogenerace s plynovými jednotkami v budoucnu velmi zajímavým způsobem vlastní výroby elektřiny v objektech určených pro bydlení.

Seznam symbolů

C_E	cena nakoupené elektřiny	(Kč/kWh)
C_{EK}	cena vyráběné elektřiny z plynu	(Kč/kWh)
C_Q	cena plynu	(Kč/kWh)
C_j	cena kogenerační jednotky	(Kč)
C_d	cena z prodeje elektřiny	(Kč/rok)
ΔC	základní finanční úspora	(Kč/rok)
ΔC_c	celková finanční úspora	(Kč/rok)
D	doba návratnosti	(rok)
E	skutečná spotřeba elektřiny	(kWh)
E_z	základní spotřeba elektřiny	(kWh)
e	teplárenský modul	(-)
k	koeficient vlastní spotřeby	(-)
P	elektrický výkon	(kW)
Q	skutečná spotřeba plynu	(kWh)
\dot{Q}	tepelný výkon	(kW)
Q_p	příkon v palivu	(kW)
Q_i	výhřevnost zemního plynu	(J/m ³)
Q_s	spalné teplo zemního plynu	(J/m ³)
Q_z	základní spotřeba plynu	(kWh)
RPN	roční provozní náklady	(Kč/rok)
η_e	elektrická účinnost	(-)
η_q	tepelná účinnost	(-)
η_c	celková účinnost	(-)
η_{min}	minimální účinnost	(-)

Seznam použité literatury

[1] Bělohávek, K. : *Mikro-kogenerační jednotka*. Bakalářská práce, ČVUT v Praze 2011.

[2] Nedvědický, L. : *Současné trendy mikro-kogenerace*. Dny kogenerace, říjen 2011, Praha.

[3] Lane, N.W., Wood, J.G., Unger, R.Z. : *Free-piston Stirling Machine Commercialization Status at Sunpower*. International Stirling Engine Conference, 19. až 21. září 2003, Řím, Itálie.

[4] Lane, N.W. : *Commercialization Status of Free-piston Stirling Machines*. International Stirling Engine Conference, listopad 2005, Durham, UK.

[5] *Beiträge der Kategorie 'Stirlingmotor-BHKW'*. [online], přístupné z: <http://www.bhkw-prinz.de/category/bhkw-technologien/stirlingmotor> [cit. 20. 3. 2013].

[6] *Index of Stirling engine manufactures (post 1940) - Sigma Elektroteknisk A.S.* [online] přístupné z: <http://www.stirlingengines.org.uk/manufact/manf/misc/sig.html> [cit. 20. 3. 2013].

[7] *Webová prezentace společnosti Enatec*. [online], přístupné z <http://www.enatec.com> [cit. 16. 2. 2011].

[8] *Vitotwin 300-W: the innovative CHP system for single and two-family homes*. [online], přístupné z: http://www.viessmann.com/com/en/press/press_releases/combined_heating_and_power/shk-107024.html [cit. 24. 03. 2013].

[9] *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 4/2012 ze dne 26. listopadu 2012*. [online], přístupné z: http://www.eru.cz/user_data/files/ERV/ERV8_2012.pdf [cit. 23. 3. 2013].

[10] *Přehled cen zemního plynu pro kategorii domácnost a malooběratel*. [online] přístupné z: <http://www.rwe.cz/cs/do-zp-ceny-zp-RWE-Energie/> [cit. 20. 3. 2013].

[11] *Ceník elektřiny skupiny ČEZ včetně regulovaných cen za dopravu elektřiny - domácnost*. [online], přístupné z <http://www.cez.cz/cs/pro-zakazniky/ke-stazeni/ceniky-a-produktove-listy/domacnosti.html> [cit. 20. 3. 2013].