

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

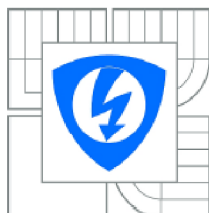
NÁVRH AUTONOMNÍHO ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

STANISLAV VINKLER

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Stanislav Vinkler
Ročník: 3

ID: 73070
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Návrh autonomního zdroje elektrické energie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Přehled možných autonomních zdrojů.
2. Stanovení výkonu autonomního zdroje.
3. Návrhy autonomního zdroje pro rodinný dům.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení navržených zdrojů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Antonín Matoušek, CSc.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

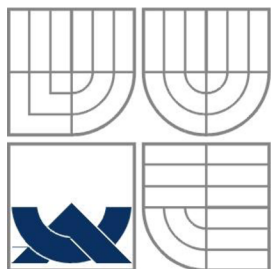
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

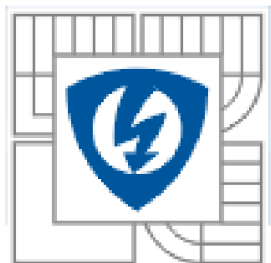
VINKLER, S. Návrh autonomního zdroje elektrické energie. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2011, 45 stran.

Prohlašuji, že jsem svou **bakalářskou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

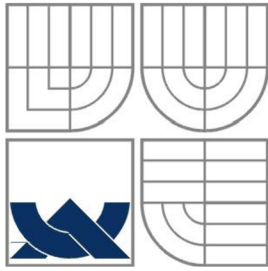
Návrh autonomního zdroje elektrické energie

Stanislav Vinkler

vedoucí: doc. Ing. Antonín Matoušek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2011

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

Project for an autonomous source of electrical energy

by

Stanislav Vinkler

Supervisor: doc. Ing. Antonín Matoušek, CSc.

Brno University of Technology, 2008

Brno

ABSTRAKT

Tato práce si klade za cíl pojednat o možném využití autonomních (tedy nezávislých) zdrojů elektrické energie pro napájení rodinného domu. První část bude zaměřena na rozdělení těchto zdrojů z hlediska přeměny různých druhů energie na energii elektrickou. U každého zdroje bude vždy uveden princip výroby elektrické energie a soupis hlavních částí celého systému. Druhá část potom bude zaměřena na stanovení potřebného výkonu od autonomního zdroje tak, aby byla zajištěna dodávka elektrické energie pro modelový rodinný dům. Ve třetí části práce budou provedeny vlastní návrhy autonomních zdrojů, konkrétně návrh malé vodní elektrárny a návrh kogenerační jednotky. Poslední část je zaměřena na technicko-ekonomické zhodnocení navržených zdrojů.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Autonomní zdroj; zdroje elektrické energie; přeměna energie; elektrárna; elektrický výkon; malá vodní elektrárna; kogenerační jednotka.

ABSTRACT

Purpose of the thesis is enlarged the theory about potential utilization of an autonomous (autonomic) electric power supply used for a family house. Forepart will dealt with description of the resources in accordance with conversion of different kinds of energy to electric power. There will be always given the principle of the power generation as well as a list of main components of the system for each single source. Second part will be focused on generator output assessment of the autonomous source to ensure the power supply for the model family house. There will be my own design of the autonomous sources namely a project of a small hydropower plants and a project of a cogeneration unit in the third section of the thesis. The last part is aimed at the techno-economical evaluation of the engineered sources.

KEY WORDS:

Autonomous source; sources of electrical energy; transformation of energy; power station; electrical power; small hydro power; cogeneration unit.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	4
SEZNAM TABULEK	5
1 ÚVOD	6
2 ROZDĚLENÍ ZDROJŮ ELEKTRICKÉ ENERGIE	7
2.1 PŘEHLED MOŽNÝCH AUTONOMNÍCH ZDROJŮ	8
2.1.1 SOLÁRNÍ ELEKTRÁRNY	9
2.1.2 VODNÍ ELEKTRÁRNY	11
2.1.3 VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY	14
2.1.4 TEPELNÉ ELEKTRÁRNY SPALUJÍCÍ BIOMASU	17
2.1.5 KOGENERAČNÍ JEDNOTKY SPALUJÍCÍ BIOPLYN.....	18
2.1.6 SPECIÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRACUJÍCÍ S TEPEM ZE SOLÁRNÍCH KOLEKTORŮ	20
3 STANOVENÍ VÝKONU AUTONOMNÍHO ZDROJE	21
4 NÁVRHY AUTONOMNÍHO ZDROJE PRO RODINNÝ DŮM	24
4.1 NÁVRH MALÉ VODNÍ ELKTRÁRNY	24
4.1.1 HYDROENERGETICKÝ POTENCIÁL VODNÍHO TOKU	25
4.1.2 STANOVENÍ MINIMÁLNÍHO VÝPOČTOVÉHO PRŮMĚRU ŘEMENIC	26
4.1.3 NÁVRH VÝPOČTOVÝCH PRŮMĚRŮ ŘEMENIC D_1 A D_2	27
4.1.3.1 NÁVRH OSOVÉ VZDÁLENOSTI ŘEMENIC	28
4.1.3.2 URČENÍ DÉLKY ŘEMENE	28
4.1.4 NÁVRH VYVEDENÍ VÝKONU	30
4.1.5 ELEKTRICKÉ OCHRANY	32
4.1.6 STAVEBNÍ ŘEŠENÍ MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	34
4.2 NÁVRH KOGENERAČNÍ JEDNOTKY	35
4.2.1 POTŘEBA TEPLA NA PŘÍPRAVU TEPLÉ VODY	36
4.2.2 POTŘEBA TEPLA NA VYTÁPĚNÍ.....	37
4.2.3 VÝPOČET ZBYTKOVÉHO TEPLA V LETNÍM OBDOBÍ PRO OHŘEV VODY V BAZÉNU.....	38
5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ NAVRŽENÝCH ZDROJŮ	39
5.1 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PROVOZU MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY	39
5.2 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ PROVOZU KOGENERAČNÍ JEDNOTKY	40
6 ZÁVĚR.....	42
POUŽITÁ LITERATURA	44

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Rozdělení zdrojů energie.....</i>	<i>7</i>
<i>Obr. 2 Přímá a nepřímá přeměna sluneční energie.....</i>	<i>8</i>
<i>Obr. 3 Průměrná hodnota energie slunečního záření v ČR dopadající za rok.....</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 4 Systém s akumulací elektrické energie.....</i>	<i>10</i>
<i>Obr. 5 Kombinace různých druhů přeměn energie.....</i>	<i>10</i>
<i>Obr. 6 Přeměna mechanické energie na elektrickou.....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 7 Měření spádu vodního toku.....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 8 Rozdělení větrných motorů dle funkce.....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 9 Nejužívanější typy rotorů větrných motorů.....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 10 Hlavní části větrné elektrárny.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 11 Půdorys modelového rodinného domu.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 12 Lokalita pro výstavbu malé vodní elektrárny.....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 13 Diagram určení potřebného průřezu klínového řemene.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 14 Profily řemenic a schéma k výpočtu délky klínového řemene.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 15 Jistič LPE-25C-3 s vypínací charakteristikou.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 16 Napětovo-frekvenční ochrana RUFm.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 17 Schéma pro návrh vyvedení výkonu z malé vodní elektrárny.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 18 Stavební řešení strojovny malé vodní elektrárny.....</i>	<i>35</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Použití základních typů vodních turbín v závislosti na spádu vodního toku.....</i>	<i>11</i>
<i>Tab. 2. Seznam spotřebičů a nářadí u modelového příkladu rodinného domu.....</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 3. Ke stanovení P_{max}.....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 4. Minimální výpočtové průměry řemenic.....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 5. Normalizované velikosti výpočtových průměrů řemenic.....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 6. Normalizované výpočtové délky L_p.....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 7. Technické údaje ecoGEN-12AG.....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 8. Pořizovací náklady malé vodní elektrárny.....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 9. Pořizovací náklady kogenerační jednotky.....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 10. Spotřeba zemního plynu kogenerační jednotky.....</i>	<i>41</i>

1 ÚVOD

Život bez elektrické energie v dnešní době si člověk, žijící v civilizované společnosti jen těžko dokáže představit. I přes dnešní vyspělou technologii a propracovanou stálou elektrorozvodnou síť mnohdy nastává situace, kdy se člověk, zejména díky přírodním živlům někdy ocitne bez dodávky elektrické energie. Při výrobě elektrické energie může dojít v elektrárně k různým havarijním situacím, při kterých je nutné přerušit samotnou výrobu např. odstavením reaktoru a zahájením jeho chlazení. V takových případech, kromě jiného, hraje důležitou roli použití autonomních zdrojů elektrické energie, čili zdrojů, které jsou nezávislé na stálé elektrorozvodné síti. Tyto zdroje mohou být realizovány i v odlehlých místech, kde stálá elektrifikace nemůže být provedena z ekonomických, ekologických či jiných závažných důvodů.

Tato práce si klade za cíl pojednat o jednotlivých přeměnách různých forem energie na energii elektrickou, uvést základní přehled možných autonomních zdrojů, které by mohly být využity k napájení rodinného domu a teoreticky navrhnout dva různé typy autonomních zdrojů, konkrétně návrh malé vodní elektrárny a návrh kogenerační jednotky. Tyto návrhy budou v závěrečné části podrobeny technicko-ekonomickému zhodnocení.

2 ROZDĚLENÍ ZDROJŮ ELEKTRICKÉ ENERGIE

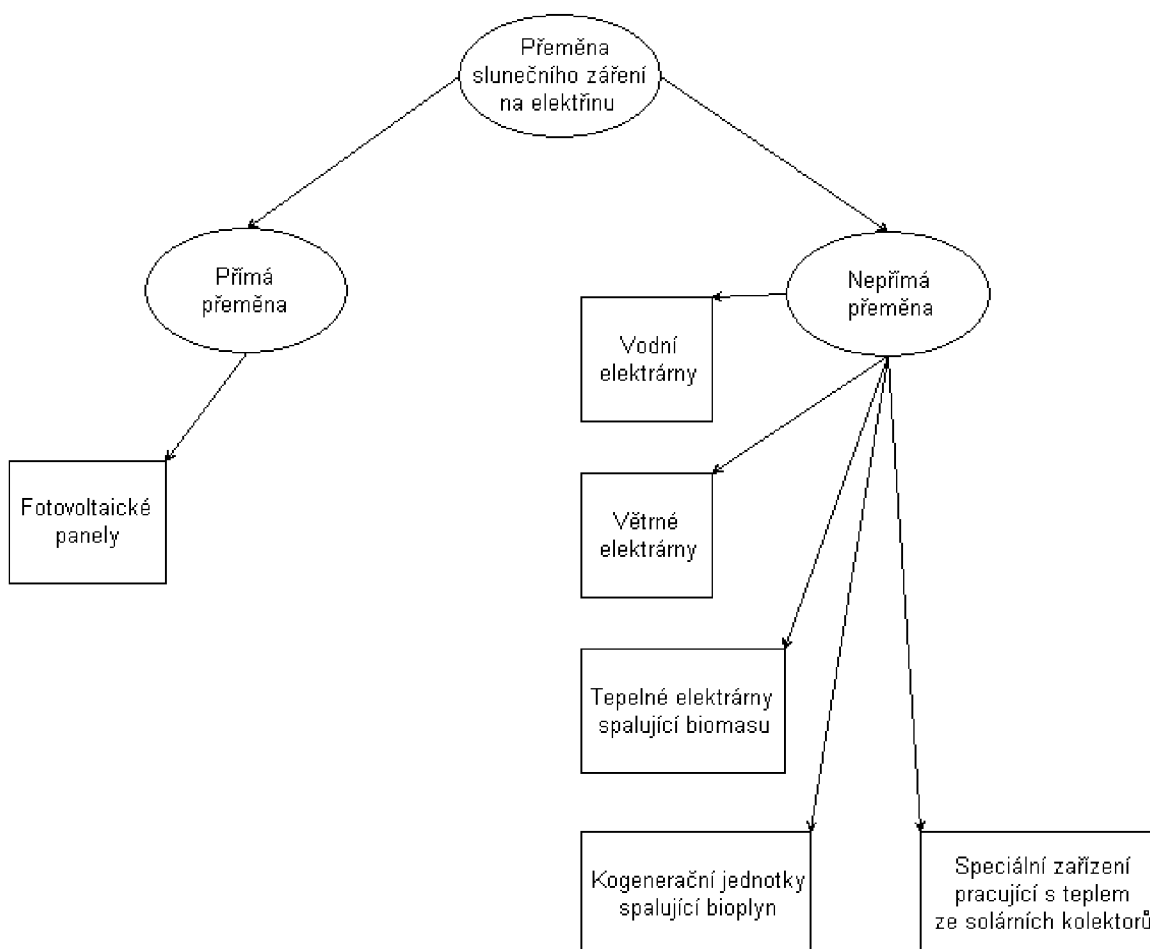
Čistá elektrická energie, tak jak ji známe z běžného života, se v přírodě nevyskytuje. Tento problém je řešen přeměnou jiných druhů energie (např. světelné) na energii elektrickou. Tato přeměna energie, podle technologie samotné přeměny se dále dělí na přímou přeměnu a nepřímou přeměnu energie [3], kde u přímé přeměny odpadá mezistupeň přeměny, obvykle mechanická energie. Samotná přeměna energie se uskutečňuje v zařízeních, které nazýváme elektrárny. Základní rozdělení zdrojů energie je znázorněno na Obr. 1.



Obr. 1 Rozdělení zdrojů energie

2.1 Přehled možných autonomních zdrojů

Z Obr. 1 je patrné, že některé zdroje energie se nebudou týkat autonomních zdrojů elektrické energie. Z hlediska jaderné bezpečnosti bude například nevyhovující použití jaderné energie pro účel napájení rodinného domu. Stejně tak nepřipadá v úvahu využití energie moří v našich geografických podmínkách. Naopak velkou skupinu použitelných zdrojů elektrické energie pro náš účel budou tvořit zařízení využívající sluneční, vodní, větrné, tepelné a chemické energie. Pro lepší orientaci tedy v dalším budeme uvažovat pouze energii slunce, jako primární zdroj energie, která se dále dá přeměnit přímo či nepřímo na energii elektrickou, jak je znázorněno na Obr. 2.



Obr. 2 Přímá a nepřímá přeměna sluneční energie

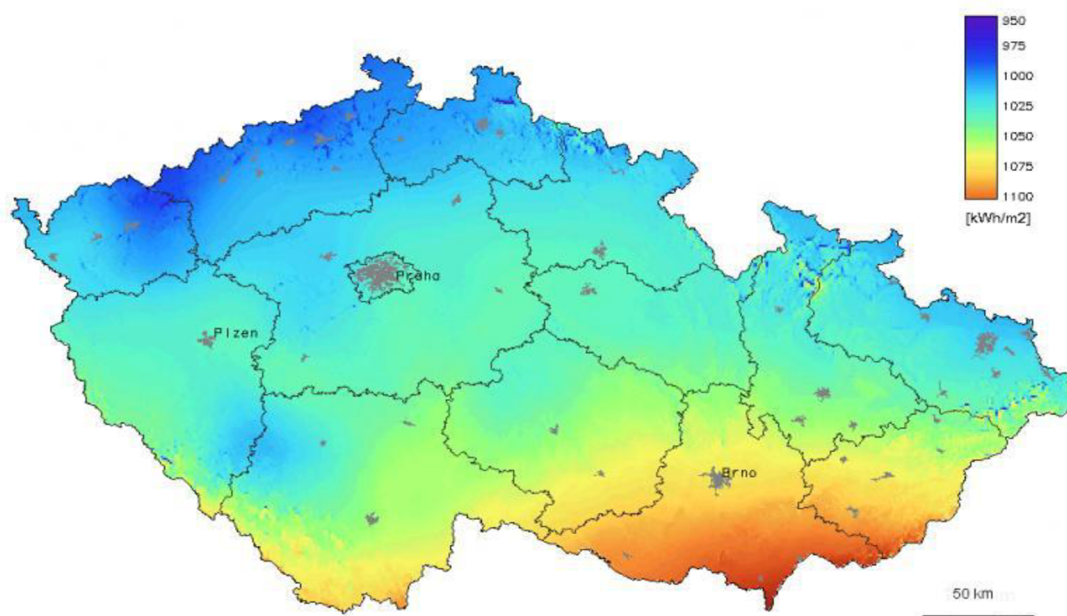
2.1.1 Solární elektrárny

Solární elektrárny získávají energii ze slunečního záření a tuto energii následně mění přímo v energii elektrickou prostřednictvím fotovoltaických panelů nebo v energii tepelnou, ohřevem média umístěném ve slunečním kolektoru, popřípadě se využívá obou těchto přeměn v kombinovaných fotoelektrických a fototermických kolektorech.

Pro vlastní přeměnu na elektrickou energii je využit vnitřní fotoelektrický jev v polovodiči, kdy sluneční záření dopadá na rozhraní dvou polovodičových materiálů (PN přechod). Následkem je uvolnění elektronů v N vrstvě, které se dále přesouvají k P vrstvě. Pokud tento PN přechod spojíme vodičem a zatížíme spotřebičem, začne v tomto jednoduchém elektrickém obvodu procházet proud, který koná práci. Tento popsáný jev se děje v jednoduchém fotovoltaickém článku. Spojením těchto článků následně vznikne fotovoltaický panel. Pro dosažení požadovaného výkonu se musí dále pospojovat několik těchto panelů.

Protože většina spotřebičů potřebuje ke své činnosti zdroj střídavého elektrického proudu, musí se systém fotovoltaických panelů doplnit měničem stejnosměrného proudu na střídavý – střídačem, který může být podle dalších požadavků v provedení jednofázovém, či třífázovém.

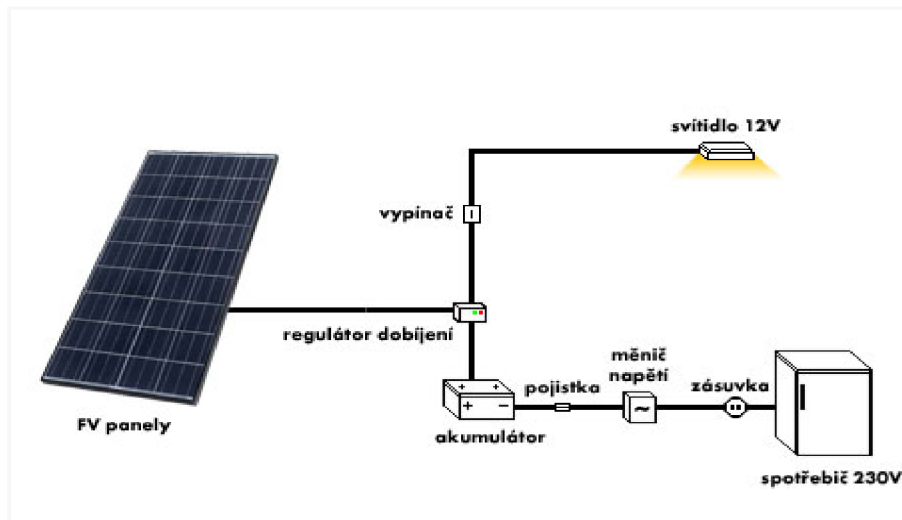
Takto popsáný systém solární elektrárny by fungoval pouze v případě, kdyby stále svítilo slunce s dostatečnou intenzitou. Z Obr. 3 je patrné, že průměrná hodnota intenzity slunečního záření na našem území je závislá i na poloze. Nejlepší hodnoty z tohoto pohledu vykazuje umístění solárních článků v jižních částech České republiky. Dále pak je logické, že v nočních hodinách nebude takovéto zapojení postačující a bude muset být doplněno zařízením, které bude vyrobenou energii akumulovat, nebo zařízením, které bude přeměňovat jiný zdroj energie.



Obr. 3 Průměrná hodnota energie slunečního záření v ČR dopadající za rok [17]

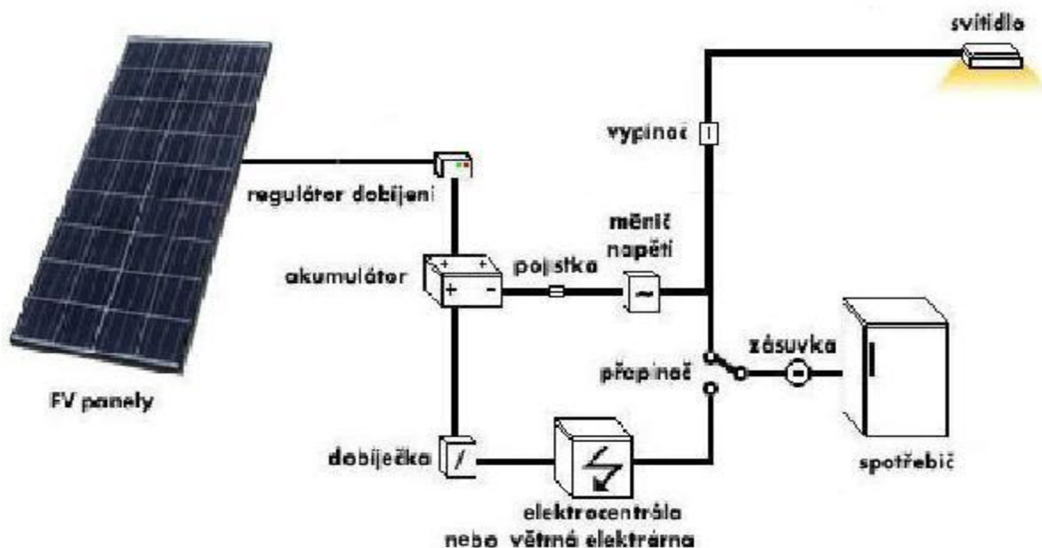
Pro akumulaci elektrické energie, vyrobené z obnovitelných zdrojů se většinou používají chemické akumulátory olověné, nebo alkalické (Ni-Fe nebo Ni-Cd). Každý z těchto druhů baterií má své přednosti i nedostatky. Olověné mají menší pořizovací náklady a větší energetickou účinnost, ale vyrábějí se především pro spouštění spalovacích motorů. Niklkadmiové a niklželezné akumulátorové baterie mají výrazně delší životnost a jsou méně náročné v provozu z hlediska přebíjení a hloubky vybití. Jsou i menší ekologickou zátěží pro životní prostředí.

Další možností akumulace je ukládání elektrické energie v podobě vodíku, který vzniká elektrolýzou vody. Vzniklý vodík se potom může využít zpětně k výrobě elektrické energie tepelnou přeměnou, nebo přeměnou v palivových článcích. Systém, využívající uchování elektrické energie v podobě energie vnitřní – chemické v bateriích je vyobrazen na Obr. 4.



Obr. 4 Systém s akumulací elektrické energie [17]

Protože je potřeba vyšších výkonů k napájení větších spotřebičů, musel by se tento systém doplnit několika akumulátory. Ty by v době nevhodných podmínek pro fotovoltaické panely mohly být zatěžovány po dobu několika hodin jejich plnou kapacitou a klesala by rychleji jejich životnost. Proto je z tohoto důvodu vhodnější systém, který by využíval jiného zdroje elektrické energie a sloužil by, jako záskok. V úvahu připadá použití kombinace dieselaagregátových zdrojů nebo malých větrných elektráren. Pro plynulý přechod jednoho systému k druhému bude nutné tuto kombinaci doplnit ještě akumulátory. Z těch bude energie odebírána jen po dobu nutnou ke spuštění dieselaagregátu či větrné elektrárny a připojením zátěže. Tyto kombinace jsou znázorněny na Obr. 5.



Obr. 5 Kombinace různých druhů přeměny energie [17]

K vlastnímu provedení autonomního zdroje elektrické energie, využívajícího sluneční záření jsou tedy potřebné tyto součásti:

- Fotovoltaické panely pospojované k dosažení potřebného výkonu
- Měnič napětí

- Akumulátory pro akumulaci energie a záskok
- Regulátory dobíjení
- Dieselaagregát, nebo větrná elektrárna
- Záskokový rozváděč (přepínač na Obr. 5)
- Kabeláž a pomocná zařízení (podpěry pro fotovoltaické panely)

Pro případ, kdyby povětrnostní podmínky nebyly vhodné, jak pro výrobu elektrické energie fotovoltaickými panely, tak větrnou elektrárnou (velká oblačnost a bezvětří), je nutné k zajištění dodávky elektrické energie použít kombinaci například s dieselaagregátovou elektrickou centrálou. Tyto nutné kombinace však výrazně zvyšují pořizovací náklady na tento systém.

2.1.2 Vodní elektrárny

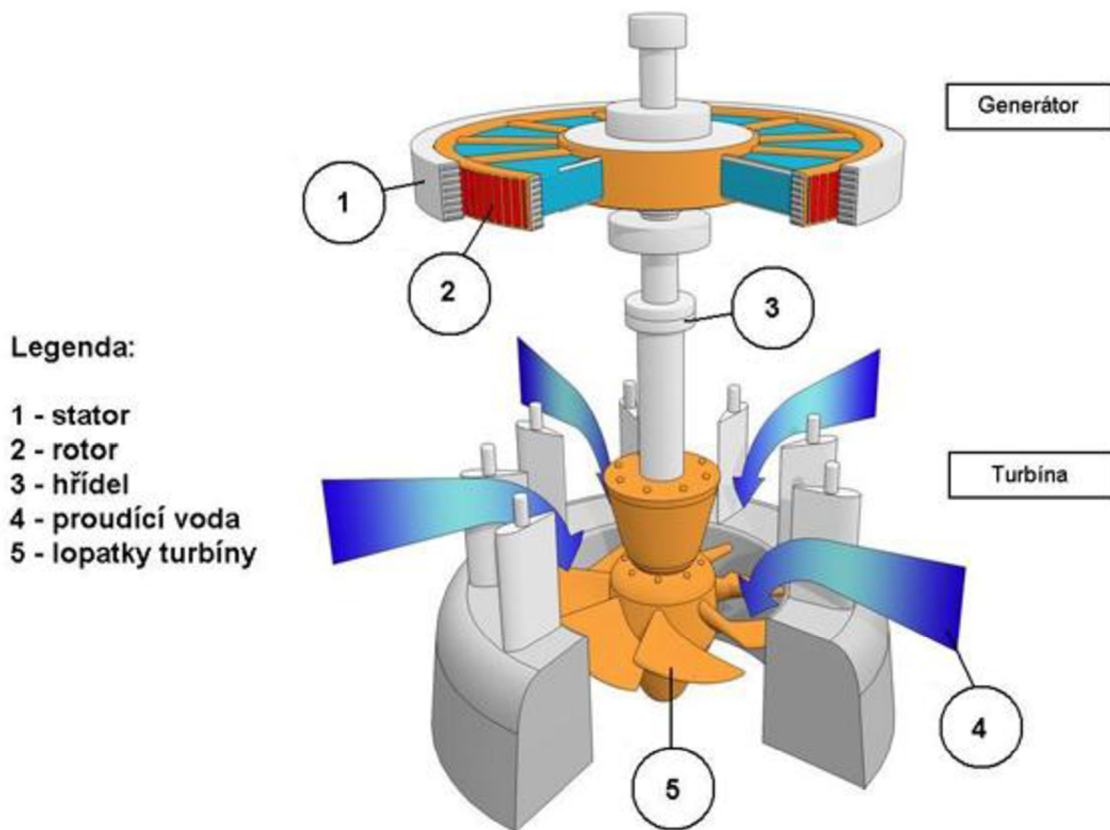
V tomto typu elektrárny je využito energie vodních toků. Ta se projevuje, jako energie potenciální (tlaková a polohová) a energie kinetická. Přeměna energie vody na energii mechanickou patří k nejstarším způsobům využívání obnovitelných zdrojů energie. V historii se nejdříve energie vody používala k pohánění vodních kol vertikálních pro mlýnské kameny, později horizontálních s přenosem otáčení na vertikálně uspořádané mlýnské kameny. Tyto kola se v dalším vývoji staly základem pro první vodní turbíny. Turbíny tedy zprostředkovávají přeměnu energie vodního toku na čistou mechanickou energii, která otáčí hřídeli. V současné době se využívá několik typů vodních turbín. Konkrétní použití turbíny závisí na zpracovávaném spádu vodního toku, jak uvádí Tab. 1.

Tab. 1. Použití základních typů vodních turbín v závislosti na spádu vodního toku[1]

Konstrukce vodní turbíny	Spád vodního toku
Kaplanova	1–20 m
Bánkiho	5–60 m
Kaplanova, Dériazova a Francisova	20 – 100 m
Peltonova	větší než 100 m

Kromě základních typů vodních turbín, které jsou uvedeny v Tab. 1 existuje mnoho dalších méně známých typů (SETUR, Savoniova, Teslova, Vrtulová).

K přeměně mechanické energie, kterou obstarává vodní turbína, na elektrickou energii se využívá elektromagnetické indukce. Zařízení, které mění energii mechanickou na energii elektrickou, využívá elektromagnetické indukce, se nazývá elektrický generátor. Rotor generátoru je možné připojit na společnou hřídel turbíny (turboalternátor), nebo přes převodovku, která umožní zrychlení otáčivého pohybu hřídele. U vodních elektráren se používá synchronní i asynchronní generátor. Celý princip přeměny mechanické energie na elektrickou je znázorněn na Obr. 6.



Obr. 6 Přeměna mechanické energie na elektrickou [18]

V režimu výroby a dodávky elektrické energie do pevné sítě se využívá asynchronního generátoru, který při své činnosti odebírá ze sítě jalový výkon, nutný ke své činnosti. Tento jalový výkon je v případě výroby větších výkonů nutné kompenzovat pomocí kondenzátorových baterií. Kombinací kompenzace, která má kapacitní charakter, společně s impedancí generátoru, která má induktivní charakter, mohou při provozu vznikat rezonanční jevy, při kterých mohou být proudově přetěžovány jednotlivé části obvodu. Další nevýhodou kompenzace je stav, kdy nastane výpadek sítě a kapacitní výkon baterií pokrývá potřeby stroje. Potom se může zvláště při zvýšení otáček na svorkách generátoru objevit až dvojnásobné jmenovité napětí, což je nežádoucí stav a při navrhování výkonu kondenzátorových baterií se k tomuto stavu musí přihlídnout. I přes všechny výše vyjmenované nevýhody je asynchronní generátor hojně využíván v malých vodních elektrárnách, které vyrábí elektrickou energii a dodávají ji zpět do elektrorozvodné sítě, zejména kvůli nízké pořizovací hodnotě a vysoké spolehlivosti.

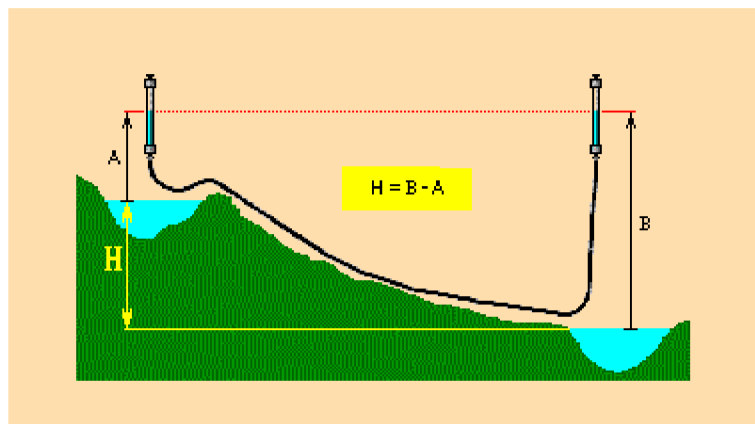
Ve vodních elektrárnách, v případě autonomního provozu jsou využívány k přeměně mechanické energie na elektrickou, synchronní generátory. U synchronních generátorů je z teorie elektrických strojů známý vztah:

$$f = n \cdot p \quad (\text{Hz}; \text{s}^{-1}, -). \quad (2.1)$$

, kde (p) je počet pólových dvojic a (n) jsou otáčky rotoru generátoru.

Z rovnice (2.1) je patrné, že při konstrukci samotného generátoru můžeme vhodnou volbou počtu pólů snížit počet synchronních otáček na hodnotu, kterou požadujeme od samotné vodní turbíny na vodním toku. Aby při malých otáčkách turbíny nevycházely veliké hodnoty pro počet pólových dvojic, což má za následek zvětšení rozměrů generátoru, využívá se pro připojení generátoru k hřídeli turbíny převod do rychla. Protože při autonomním provozu obvykle není možnost připojení k elektrorozvodné síti, je nutné použít synchronní generátor s nezávislou budicí soustavou. Zdrojem budicí energie bude v tomto případě točivý stejnosměrný nebo střídavý budič, poháněný hřídelem buzeného stroje. Takové generátory u nás vyrábí například firma TES Vsetín, a.s., konkrétně v řadě GSH.

Pro vlastní návrh malé vodní elektrárny je důležité znát průtok a spád vodního toku v místě instalování turbíny. Průtok $\{Q\}$, který je spjat s kinetickou energií vodního toku, vyjadřuje objem vody, který proteče v daném využitelném profilu za jednotku času. Obvykle se udává v $[m^3 \cdot s^{-1}]$ nebo $[l \cdot s^{-1}]$. Pro využití energie vody je nejdůležitější znát M-denní průtok, což je zaručený průtok, který proteče v daném místě za určitý počet dní. Malé vodní elektrárny se nejčastěji dimenzují na 90 – ti, nebo 180 - ti denní průtok. Přesný průtok lze zjistit od Českého hydrometeorologického ústavu, nebo příslušné správy toku. Spád $\{H\}$, který je spjat s potenciální energií vodního toku představuje výškový rozdíl vodních hladin a udává se v $[m]$. Rozlišujeme spád celkový (hrubý) a spád užitečný (čistý). Při návrhu je nutné počítat se spádem užitečným, který získáme tak, že od hrubého spádu odečteme hydraulické ztráty vznikající přívodem vody k turbíně. Spád se dá hrubě určit z vrstevnicové sítě na mapách, nebo přesněji měřením, jak je znázorněno na Obr. 7.



Obr. 7 Měření spádu vodního toku [19]

Další ztráty vznikají při samotné přeměně v turbíně a v generátoru. Jestliže známe hodnotu průtočného objemu $\{Q\}$, užitečného spádu $\{H_u\}$, účinnosti generátoru $\{\eta_g\}$ a turbíny $\{\eta_t\}$, můžeme předběžně vypočítat výkon malé vodní elektrárny jako:

$$P = 9,81 \cdot H_u \cdot Q \cdot \eta_g \cdot \eta_t \quad (\text{kW}; \text{m}; \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}; -; -). \quad (2.2)$$

K samotné výstavbě malé vodní elektrárny, která má být provozovaná v autonomním režimu jsou potřebné tyto hlavní součásti:

- Vodní turbína

- Převodovka „do rychla“ mezi hřídelí turbíny a hřídelí generátoru
- Synchronní generátor s nezávislou budicí soustavou

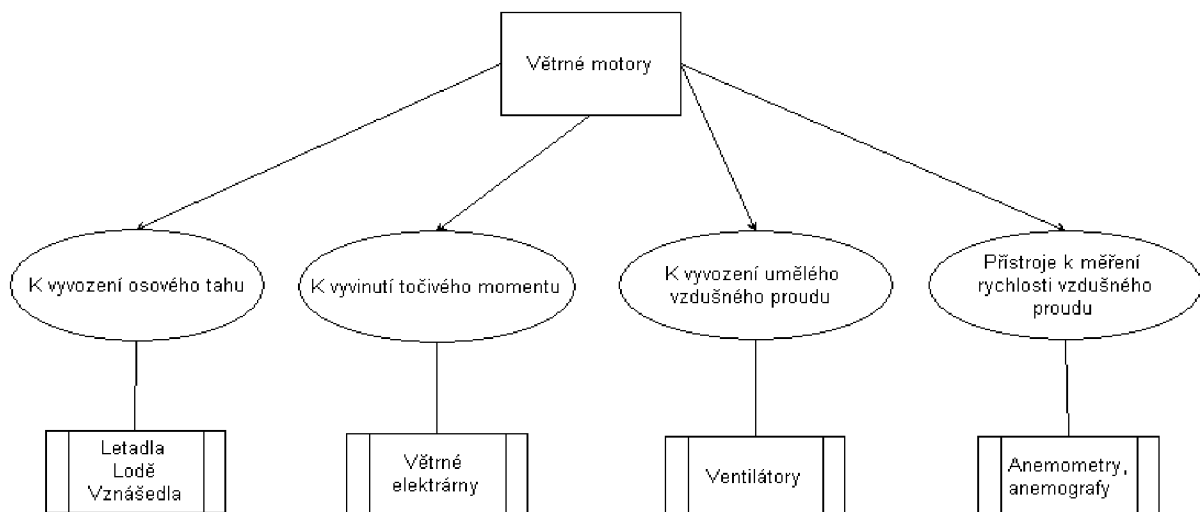
Pro náš případ, tedy pro napájení rodinného domu bude vyhovovat Kaplanova-S, nebo Bánkiho turbína v závislosti na spádu a průtoku vodního toku.

Kromě těchto dvou hlavních částí bude nutné investovat do samotné úpravy vodního toku, výstavby strojovny, konstrukce česlí apod.

2.1.3 Větrné elektrárny

Ve větrných elektrárnách se využívá kinetické energie větru. Tato energie byla odpradáвна využívána k pohonu větrných mlýnů. Zde se měnila energie větru na energii mechanickou, která poháněla vlastní soustrojí mlýnů. Ty pak sloužily nejčastěji k mletí obilí, pohonu katrů na řezání dřeva, čerpání vody a jiných zařízení. Na našem území byly větrné mlýny stavěny častěji na Moravě. V Čechách se k pohonu takových zařízení, dle [6] častěji používalo kolo vodní, které mělo větší účinnost a dokázalo například semlít za stejnou dobu až pětinasobek obilí. Kromě jiného je energie větru také používána k pohonu dopravních prostředků, nejvíce u lodí (plachetnice).

Základním prvkem větrných elektráren je větrná turbína, která zprostředkovává přeměnu energie větru na mechanickou energii a dochází tak k rotaci hřídele. Vítr tak odevzdává část své kinetické energie lopatkám větrné turbíny, ale nikdy ne celou. Maximální teoreticky možná účinnost větrného stroje je 59,3 % (1919 Albert Betz), v praxi je však účinnost ještě menší, nepřesahující 50%. Větrná turbína je jedním z větrných motorů, které z funkčního hlediska můžeme rozdělit tak, jak ukazuje Obr. 8.



Obr. 8 Rozdělení větrných motorů dle funkce

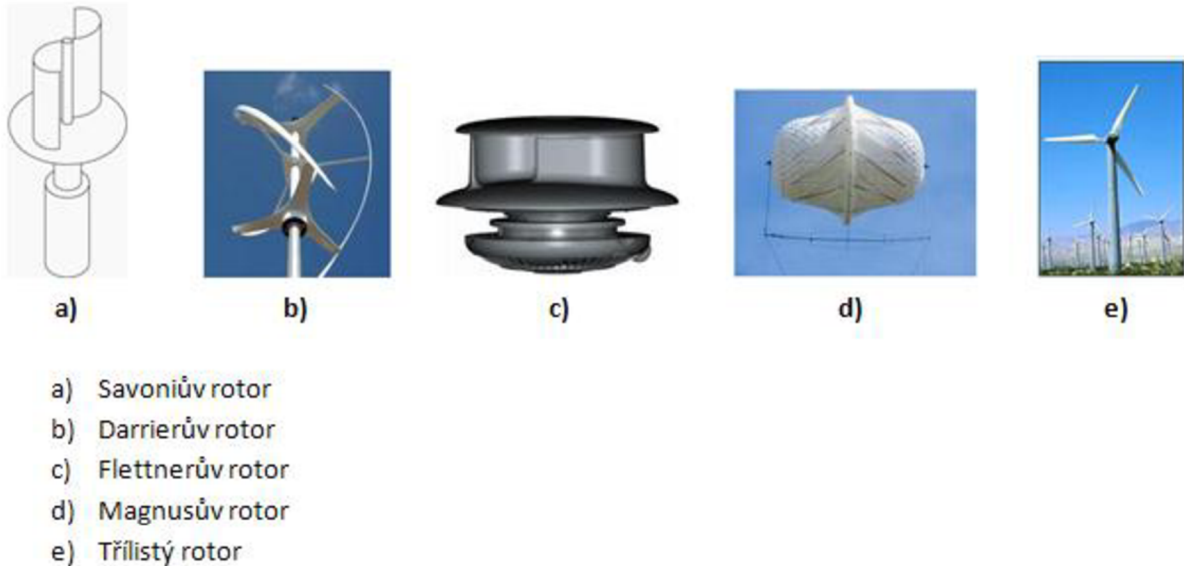
Z konstrukčního hlediska dále dělíme větrné motory do dvou základních skupin, a to:

- Motory s osou otáčení, která je rovnoběžná se směrem proudění vzduchu-horizontální osa (většina používaných konstrukcí, rychloběžné jednolísté až třílísté rotory). Tyto

motory pracují na vztakovém principu, kdy vítr obtéká lopatky s profilem podobným leteckým vrtulím.

- Motory s osou, která je kolmá na směr proudění vzduchu-vertikální osa (Darrierův, Flettnerův, Magnusův, Savoniův rotor a jejich modifikace). Pracují jak na vztakovém, tak na odporovém principu.

Všechny uvedené rotory jsou pro představu zobrazeny na Obr. 9



Obr. 9 Nejužívanější typy rotorů větrných motorů

Pro přeměnu mechanické energie na energii elektrickou se stejně, jako u vodních elektráren používá elektrický generátor. Typ generátoru se volí podle požadovaného výkonu a podle toho, zda je větrná elektrárna připojena na stálou elektrorozvodnou síť, nebo pracuje v autonomním režimu.

Podle výkonu rozdělujeme větrné elektrárny na:

- **malé** (asi do 20 kW).
- **střední** (20kW-50kW).
- **velké** (nad 50kW).

V režimu výroby a dodávky elektrické energie do pevné sítě se využívá asynchronního generátoru, který při své činnosti odebírá ze sítě jalový výkon, nutný ke své činnosti (vznik magnetického pole v rotoru), podobně jako tomu je v případě vodní elektrárny. Pro autonomní provoz se musí použít generátor s nezávislým buzením, nejčastěji synchronní generátor s permanentními magnety, kde je využito toho, že změna magnetického toku (magnety umístěny na rotoru) vyvolá v cívice (stator) pole elektrické.

Pro odhad výkonu, který můžeme z větrného motoru získat, lze podle [10] použít vzorec:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (\text{W}; \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}; \text{m}^2; \text{m} \cdot \text{s}^{-1}). \quad (2.3)$$

, kde (ρ) je hustota vzduchu, (A) je plocha, kterou vítr prochází a (v) je rychlost větru.

Z rovnice (2.3) je zřejmá dosti velká závislost výkonu na rychlosti větru (roste a klesá s třetí mocninou). S tímto faktem je spojen nejen výběr vhodné lokality pro umístění větrné elektrárny, ale také samotná regulace frekvence vyrobeného elektrického proudu.

Pro posouzení vhodné lokality k výstavbě větrné elektrárny je ideální alespoň roční měření průměrné rychlosti větru včetně četnosti směru. Toto roční měření je vhodné porovnat s dlouhodobými údaji z blízkých meteorologických stanic. Kromě toho je třeba také zvážit to, že samotný pohyb lopatek rotoru vydává průchodem větru značný hluk, proto je nutné umístit samotnou větrnou elektrárnu do vhodné vzdálenosti od obytných budov.

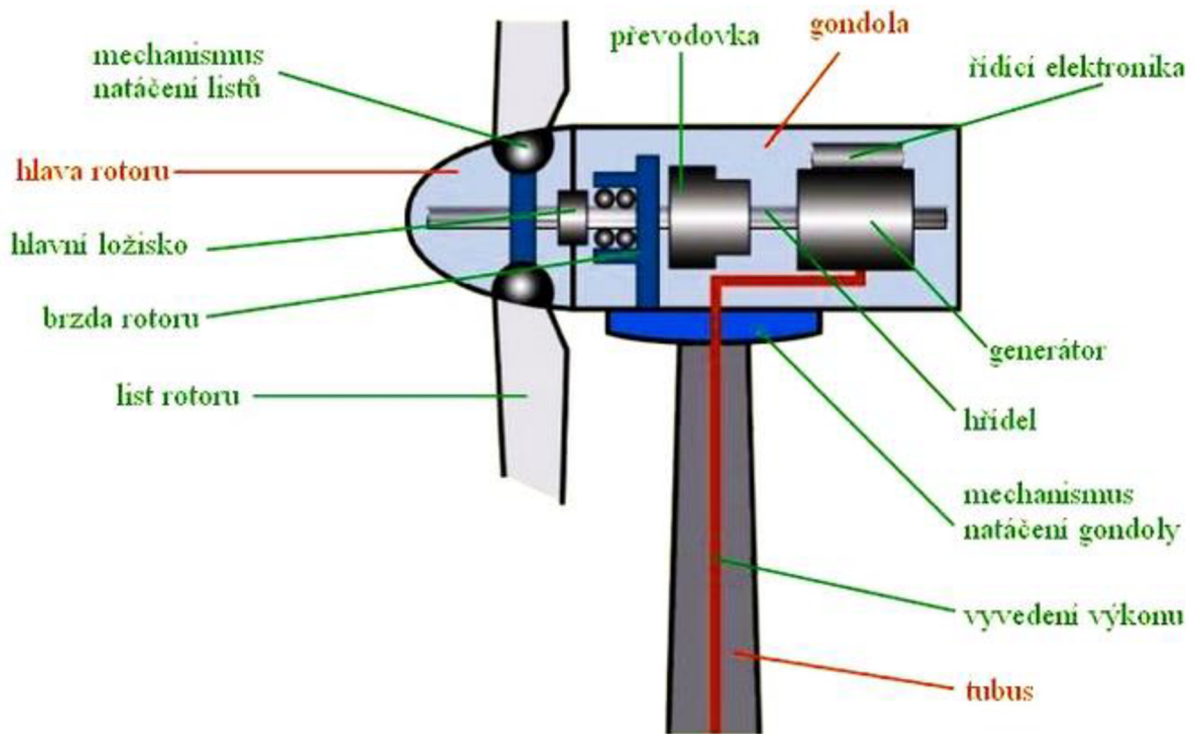
Samotná regulace frekvence vyrobeného elektrického proudu je možná třemi základními prvky celé větrné elektrárny. Rychlost otáčení hřídele je možné regulovat vhodným natočením samotných lopatek rotoru, nebo pomocí planetové převodovky, která převádí krouticí moment hřídele rotoru vrtule na hřídel synchronního generátoru. Další regulace spočívá v použití frekvenčního měniče na výstupu elektrického generátoru. Tento měnič nejdříve usměrní vyrobený elektrický proud na stejnosměrný pomocí řízeného, nebo neřízeného usměrňovače. Poté je tento stejnosměrný proud znovu převeden pomocí střídače na střídavý elektrický proud o konstantní frekvenci. Pro autonomní provoz je větrná elektrárna kombinovaná nejčastěji se solární elektrárnou, pro případ bezvětřného počasí. Při této kombinaci (Obr. 5) jsou zároveň pomocí usměrňovaného proudu dobíjeny akumulátory, které představují zálohu elektrické energie pro přechod jednoho systému na druhý.

Celá větrná elektrárna je vybavena ochrannými prvky, například pro případ velmi silného větru, kdy se celá gondola otočí z větru, popřípadě se zabrzdí rotor pomocí brzdy. Z tohoto hlediska se rychlost větru u větrných elektráren rozlišuje na:

- jmenovitou rychlost (plné zatížení).
- rychlost vypnutí (lopatky rotoru se otočí z větru).
- rychlost přežití (rychlost větru, na kterou se projektuje stabilita celého zařízení. Obvykle se tato rychlost pohybuje od 187,2 do 244,8 km/h. Výrobce přebírá záruku jen do této rychlosti).

Hlavní části větrné elektrárny jsou zobrazeny na Obr. 10. Jak již bylo zmíněno výše, pro autonomní provoz je nutné pro stálou dodávku elektrické energie i za bezvětřného počasí doplnit větrnou elektrárnu elektrárnou solární a akumulátory. Takováto kombinace je zvolena z toho důvodu, že obvykle, když nesvítí slunce (vysoká oblačnost) bývají vhodné podmínky pro vznik větru. Vznikne tak systém hybridní, který bude obsahovat tyto součásti:

- vlastní větrná elektrárna včetně tubusu (stožáru) pro umístění ve vhodné výšce.
- Fotovoltaické panely pospojované k dosažení potřebného výkonu
- Měnič napětí
- Akumulátory pro akumulaci energie a zások
- Regulátory dobíjení
- Zásokový rozváděč (přepínač na Obr. 5)
- Kabeláž a pomocná zařízení (podpěry pro fotovoltaické panely)



Obr. 10 Hlavní části větrné elektrárny [20]

2.1.4 Tepelné elektrárny spalující biomasu

Jako další zdroj energie přichází v úvahu použití biomasy, tedy organické hmoty rostlinného nebo živočišného původu, která vzniká díky fotosyntetické přeměně sluneční energie. Proto je také zařazena do obnovitelných zdrojů energie (Obr. 1). Tento zdroj energie využívá člověk od objevení ohně již od pravěku, především jako zdroj tepelné energie (spalování dřeva). Kromě jiného je dnes pro energetické účely využívána biomasa v podobě cíleně pěstovaných rychle rostoucích rostlin a odpadů vznikajících při zemědělské nebo potravinářské produkci.

Biomasu můžeme podle obsahu vody rozdělit na tři základní druhy:

- **suchá** (Lze ji spalovat přímo, nebo po vysušení. Do této skupiny patří zejména dřevo a pevné odpady z dřevařských či potravinářských provozoven).
- **mokrý** (Nelze ji spalovat přímo, musí se využít některé z chemických přeměn. Sem patří zejména výroba bioplynu z tekutého odpadu živočišné výroby-exkrementy).
- **speciální** (Použitím různých technologií lze například z olejnatých plodin získat energetické látky v podobě bionafty nebo lihu).

V tepelných elektrárnách, které přeměňují vnitřní tepelnou energii na energii elektrickou, přičemž v celém technologickém postupu využívají Rankin-Clausiovův cyklus, se jako palivo využívá především biomasa suchá. Tepelná energie paliva je za procesu hoření předávána pracovnímu médiu (ve většině případů vodě). Po přehřátí vody na sytou páru je tato vedena na vysokotlakou část parní turbíny, kde ji odevzdává energii a roztáčí ji. Ze středotlaké části je možné odebírat část tepla, např. pro vytápění budov (odběrová parní turbína). Zbytek páry expanduje v nízkotlaké části turbíny a po jejím opuštění dále odevzdává teplo v tepelném

výměníku. Poté je voda přečerpávána zpět do kotle a po cestě k němu může být použita jako chladicí médium v tepelném výměníku pro odběr tepla. Krouticí moment, který pára vyvolala v turbíně, se pomocí hřídele přenáší na elektrický generátor, který vyrábí vlastní elektrickou energii. Tento generátor je výhradně synchronní.

Celý výše uvedený princip je využíván pro výrobu elektrické energie vysokých výkonů a mohl by být využit v autonomním režimu pro dodávku elektrické energie více odběratelům. Byla by tak vytvořena rozsáhlá ostrovní síť. Důvodem je to, že nejsou komerčně dostupné parní turbíny malého výkonu, které by mohly být využity například k pohonu elektrického generátoru pro napájení rodinného domu.

Velkou výhodou procesu spalování biomasy je, že oproti spalování fosilních paliv (černé uhlí) má toto palivo v podstatě nulovou bilanci oxidu uhličitého, který je představitelem jednoho ze skleníkových plynů v zemské atmosféře.

Pro vlastní systém tepelné elektrárny jsou nezbytné tyto hlavní části:

- parní kotel
- parní turbína
- elektrický generátor
- tepelné výměníky, vodní čerpadla, potrubí
- komín s odlučovačem popílku
- chladicí věž s celým okruhem chladicí vody.

Kromě těchto hlavních částí by celá tepelná elektrárna pokryla nemalou část území (velká zastavěná plocha). Také by musela být postavena ve vhodné lokalitě nejen z důvodu určitého znečištění ovzduší, ale také pro zajištění stálého zdroje vody pro chlazení.

Toto všechno zvyšuje nároky nejen na provoz celé elektrárny, ale také na její údržbu a opravy. V případě, že by tato varianta byla zvolena, jako autonomní zdroj elektrické energie pro vytvoření ostrovní sítě, mohla by nastat situace, že v případě poruchy jedné z hlavních částí by se odběratelé ocitli bez dodávky tepelné i elektrické energie. Proto by se v tomto případě musel celý systém doplnit o druhý (záložní) systém sestávající ze stejných částí, nebo kombinací využívající jiné přeměny energie.

2.1.5 Kogenerační jednotky spalující bioplyn

Při klasické výrobě elektrické energie např. v tepelných elektrárnách (ale také jaderných) bez odběru tepla se vyrobená tepelná energie bez užitku odvádí cestou chladících věží do atmosféry. Pro zvýšení účinnosti celého tepelného oběhu je výhodné toto teplo dále využít například pro vytápění obytných budov. Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie se označuje jako kogenerace (z anglického “co-generation”). Celý systém, sestávající ze spalovací turbíny, nebo spalovacího motoru, elektrického generátoru, výměníku tepla a regulačních prvků se nazývá kogenerační jednotka. Aby celá výroba energie v těchto jednotkách byla co nejvíce ekonomicky výhodná, upravují se klasické spalovací motory tak, aby byly schopny spalovat levnější plynná paliva (zemní plyn, zkapalněný plyn, bioplyn apod.). Příkladem takového výhodného zužitkování plynného paliva jsou kogenerační jednotky umístěné například na skládkách komunálního odpadu, které využívají jako palivo skládkový plyn.

Pro využití kogenerační jednotky, jako autonomního zdroje elektrické energie je potřebné, při nedostupnosti dodávky zemního plynu, mít k dispozici jiný zdroj plynného paliva. Tento

problém řeší výstavba bioplynové stanice. V této stanici vzniká mikrobiálním rozkladem organických látek za nepřítomnosti kyslíku plynné palivo pro kogenerační jednotku – bioplyn. Bioplyn je směs plynů, která obsahuje 55 až 75% metanu, 25 až 45% oxidu uhličitého a 1 až 3% minoritních plynů, jako je dusík a vodík. Nejdůležitějším prvkem, který je obsažen v bioplynu z energetického hlediska je metan. Jeho objemem je určena celková výhřevnost vyrobeného bioplynu, která se pohybuje od 18 MJ.m⁻³ (při 50 % objemu metanu v bioplynu) do 25,6 MJ.m⁻³ (při 70 % objemu metanu v bioplynu). Pro samotnou výrobu elektrické energie využitím bioplynu, jako paliva je nutno zabezpečit dostatečné množství tohoto média. Dle [7] lze počítat s 0,6 až 0,7 m³ bioplynu na výrobu 1 kWh (průměrná produkce bioplynu od hospodářského zvířete o hmotnosti 500 kg je 1,2 m³/den).

Celá bioplynová stanice musí splňovat řadu dalších kritérií z hlediska bezpečnosti a funkčnosti. Například z důvodu nutnosti skladovat vyrobený bioplyn musí plynojemy splňovat podmínky tlakových zkoušek, neboť se jedná o tlakovou nádobu a podle provozního tlaku rozeznáváme tyto plynojemy:

- nízkotlaké ($P_p < 50\text{kPa}$)
- středotlaké ($P_p = 1 \text{ až } 2 \text{ Mpa}$)
- vysokotlaké ($P_p = 15 \text{ až } 35 \text{ Mpa}$)

Z funkčního hlediska je například důležitá minimální vlhkost vyrobeného bioplynu, čímž se zamezí kondenzaci vodních par, zamrznutí systému v zimních měsících a omezí vznik koroze na různých částech celého systému.

Pro optimální návrh celého systému je důležitá rovnice celkové účinnosti:

$$\eta = \frac{Q_{ch.} + Q_{vp} + E}{Q_c} \quad [-; MJ] \quad (2.4)$$

, kde $Q_{ch.}$ je teplo získané z chladící vody spalovacího motoru, Q_{vp} . Je teplo získané z výfukových plynů, E je vyrobená elektrická energie a Q_c je energie přivedená ve formě bioplynu, jako palivo pro spalovací motor (výhřevnost x množství).

Z rov. (2.4) je zřejmé, že pro maximální využití instalované kogenerační jednotky je nutná pokud možno stálá spotřeba tepelné energie. Ta může být v našem případě využita k ohřevu fermentoru (nádoby, ve které probíhá mikrobiální rozklad za nepřístupu kyslíku). Protože u většiny kogeneračních jednotek přibližně platí, že na každý vyrobený 1 kW elektrické energie připadají 2 kW energie tepelné, bylo by vhodné zabezpečit pokud možno stálý odběr tepla i jinou cestou (například pro vytápění bazénu, skleníku, obytných místností apod.)

Pro činnost celého systému s kogenerační jednotkou v autonomním režimu je nutné, aby vyrobená kogenerační jednotka byla osazena synchronním generátorem. Takovéto kogenerační jednotky u nás nabízejí firmy TEDOM a.s. a Motorgas s.r.o.

Celý systém výroby elektrické energie kogenerační jednotkou spalující bioplyn bude obsahovat tyto hlavní části:

- vlastní bioplynová stanice
- kogenerační jednotka
- tepelné výměníky, potrubí

Kromě těchto hlavních částí bude nutné investovat do samotné úpravy pozemku, na kterém bude vystavěna bioplynová stanice.

Na trhu jsou k dispozici i kogenerační jednotky, které jako palivo využívají zemní plyn. Tuto variantu lze zvolit tehdy, je-li ekonomicky výhodnější investovat do přípojky zemního plynu namísto výstavby bioplynové stanice.

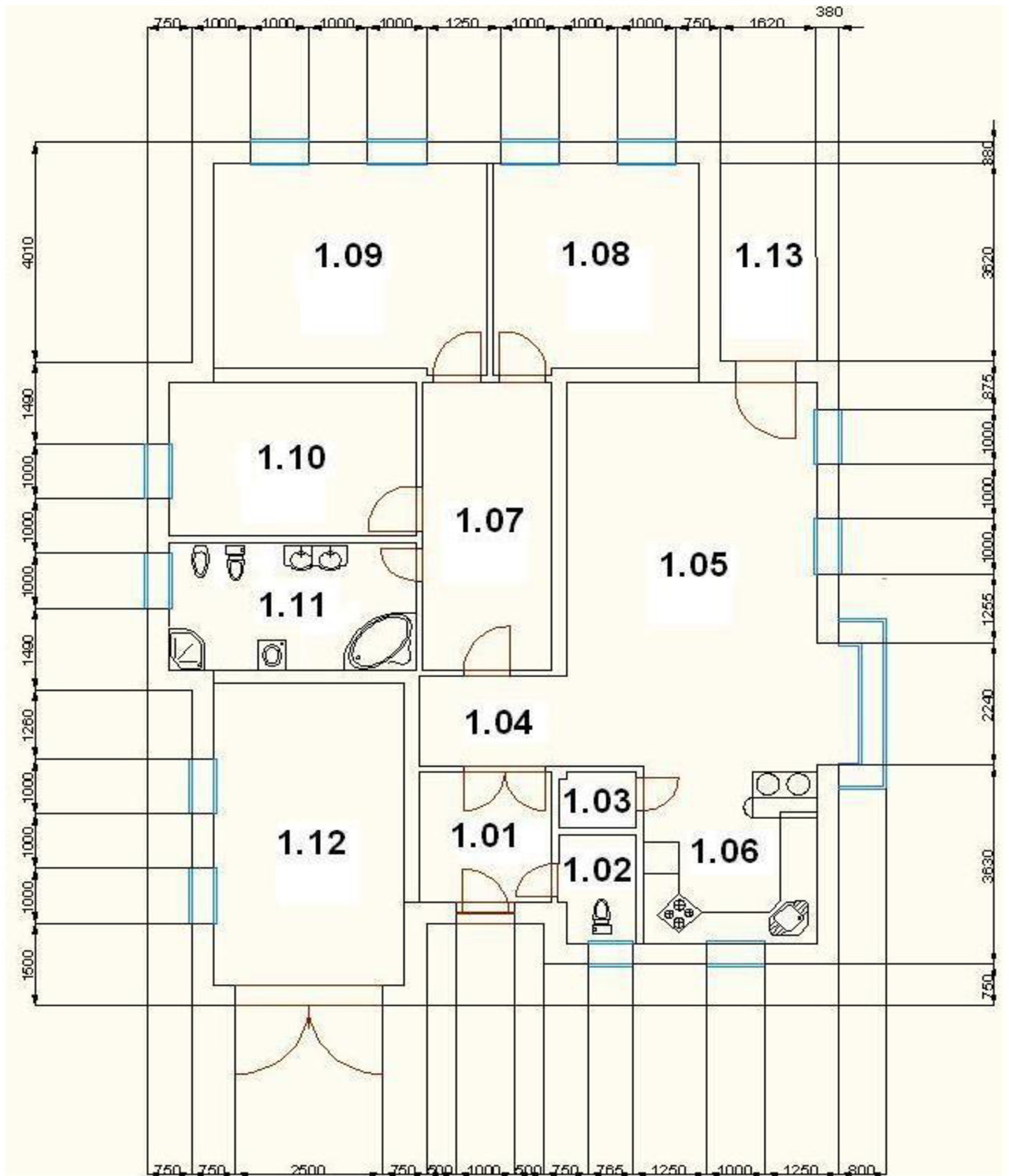
2.1.6 Speciální zařízení pracující s teplem ze solárních kolektorů

U tohoto typu elektráren dochází nejdříve k přeměně koncentrované sluneční energie na energii tepelnou. Je zde využit princip výroby elektrické energie popsáný u tepelné elektrárny, kdy je koncentrovaná sluneční energie v podobě záření odrážena soustavou zrcadlových reflektorů do jediného místa, ve kterém cirkuluje pracovní médium. Tímto médiem bývá nejčastěji syntetický olej, který je zahřán na teplotu přibližně 400 °C. Ten předá teplo vodě, která je přehřívána a vháněna na lopatky parní turbíny, kterou roztáčí. Další přeměna na energii elektrickou je uskutečňována opět v elektrickém generátoru. Pro činnost v autonomním režimu je potřebné použít například synchronní generátory s permanentními magnety.

Oba výše uvedené principy jsou využívány v místech, kde je celoročně zajištěna vysoká intenzita slunečního záření, tedy obvykle na pouštích (USA, Španělsko). V našich podmínkách by tato varianta byla velice neefektivní a je zde uvedena jen pro úplnost.

3 STANOVENÍ VÝKONU AUTONOMNÍHO ZDROJE

Jako modelový příklad rodinného domu volím byt 4+1 s garáží a dílnou. Jeho půdorys je zobrazen na Obr. 11. V Tab. 2 jsou rozepsány elektrospotřebiče (případně nářadí) a jejich maximální příkon.



Obr. 11 Půdorys modelového rodinného domu

Tab. 2 Seznam spotřebičů a náradí u modelového příkladu rodinného domu

Místnost	Spotřebič (náradí)	Příkon [W]
Chodba (1.01,1.04, 1.07)	3 x světlo	150
Obývací pokoj, jídelna (1.05)	5 x světlo	250
	plazmová televize	300
	DVD rekordér	30
	domácí kino	250
	počítač	500
Dětské pokoje (1.08, 1.10)	8 x světlo	320
	2 x LCD televize	250
	2 x rádio	30
Ložnice (1.09)	3 x světlo	120
	CRT televize	55
Koupelna+WC (1.02, 1.11)	2 x světlo	80
	2 x stropní ventilátor	10
	pračka	2200
Kuchyň (1.03, 1.06)	5 x světlo	200
	myčka na nádobí	2000
	kombinovaný sporák	3500
	mikrovlnná trouba	800
	rychlovarná konvice	2000
	vysavač	2000
	lednička	300
Garáž+dílna+terasa (1.12, 1.13)	kompresor	1500
	stolní bruska	120
	vysokotlaký čistič (vapka)	1300
Celkem	47 spotřebičů (náradí)	18265

Poznámka: Topení je v tomto rodinném domě řešeno kotlem na zemní plyn a krbem na tuhé palivo.

Instalovaný výkon všech spotřebičů je tedy 18265 W. Požadovaný výkon od autonomního zdroje bude však menší, neboť se neuvažuje, že budou všechny spotřebiče pracovat ve stejný

okamžik. K výpočtu požadovaného výkonu je nutné stanovit součinitel náročnosti (soudobosti) pro náš rodinný dům, který je definován jako [9]:

$$\beta = \frac{P_{\max.}}{P_i} \leq 1 \quad [- ; W] \quad (3.1)$$

, kde $P_{\max.}$ je maximum odběru elektrické energie v období celého roku a P_i je instalovaný výkon všech spotřebičů v objektu.

Pro určení $P_{\max.}$ uvažuji při čtyřčlenné rodině současný provoz zařízení, které ukazuje Tab. 3:

Tab. 3 Ke stanovení $P_{\max.}$

$P_{\max.}$		
Místnost	Spotřebič (náradí)	Příkon [W]
Obývací pokoj, jídelna	plazmová televize	300
	DVD rekordér	30
	domácí kino	250
Dětské pokoje	4 x světlo	160
	1 x rádio	30
Koupelna+WC	pračka	2200
Kuchyň	2 x světlo	80
	myčka na nádobí	2000
	kombinovaný sporák	3500
	lednička	300
Garáž+dílna	vysokotlaký čistič (vapka)	1300
Celkem	15 spotřebičů (náradí)	10150

Potom tedy bude β :

$$\beta = \frac{P_{\max.}}{P_i} = \frac{10150}{18265} \cong 0,55 \quad [- ; W ; W] \quad (3.2)$$

Pro modelový rodinný dům volím z výše uvedeného součinitel soudobosti $\beta = 0,55$. Nyní lze stanovit velikost požadovaného výkonu na:

$$P = 0,55 \cdot 18265 = 10046 \text{ W} \quad (3.3)$$

Vypočtený výkon zaokrouhlím na hodnotu 10050 W a z důvodu rezervy tuto hodnotu zvětším o 1 kW (možnost dokoupení dalších menších elektrospotřebičů, které by byly současně v provozu). Výsledný výkon, požadovaný od autonomního zdroje elektrické energie bude:

$$P = 11 \text{ kW}$$

4 NÁVRH AUTONOMNÍHO ZDROJE PRO RODINNÝ DŮM

Z přehledu možných autonomních zdrojů jsem pro vlastní návrh autonomního zdroje elektrické energie zvolil dvě varianty. První varianta se bude zabývat návrhem malé vodní elektrárny v lokalitě bývalého vodního mlýna (Táborský mlýn) nedaleko města Třebíč, kde bude využit stávající náhon pro mlýnské kolo. Druhá varianta se potom bude zabývat návrhem kogenerační jednotky, která bude jako palivo využívat zemní plyn.

4.1 Návrh malé vodní elektrárny

Pro návrh malé vodní elektrárny jsem zvolil lokalitu bývalého vodního mlýna na vodním toku Jihlava. Lokalita je výhodná zejména proto, že je umístěna blízko místní komunikace a je proto snadno přístupná, zároveň je tato lokalita odlehlá od okolních budov, takže odpadá případný problém s hlučností při případném provozu. Nevýhodou je to, že zvolená lokalita je soukromým majetkem. To může být značnou překážkou pro případnou realizaci celého díla. Místo lokality ukazuje Obr. 12.



Obr. 12 Lokalita pro výstavbu malé vodní elektrárny[29]

Popis lokality:

GPS souřadnice: 49°12'51.253"N, 15°55'47.486"E
 Řeka: Jihlava, povodí Morava
 Kraj: Vysočina
 Okres: Třebíč
 Říční kilometr lokality: 87,6 km

Hydrologické údaje:

Dle Limnigrafické stanice Třebíč-Ptáčov dosahuje řeka Jihlava průměrného ročního stavu 93 cm a průměrný roční průtok ve zvolené lokalitě je $5,51 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Plocha celého povodí je 3117 km^2 a délka celého toku je 184,5 km.

Hrubým měřením pomocí plováku jsem v místě stávajícího náhonu naměřil průtok $0,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a určil hrubý spád $H \approx 2,2 \text{ m}$. Pro přesnější návrh by bylo nutné kontaktovat příslušného správce vodního toku a informovat se na 90-ti denní nebo lépe na 180-ti denní průtok. Při neznalosti této informace by bylo vhodné i z důvodu jisté regulace postavit za vtokem na náhon stavidlo, které by mohlo být automatizováno pro zabezpečení optimálního (konstantního) průtoku.

4.1.1 Hydroenergetický potenciál vodního toku

Základní údaje o hydroenergetickém potenciálu vodního toku v místě lokality slouží k předběžné informaci o možnostech využití potenciální energie tohoto toku. Jestliže potom chceme co nejefektivněji využít tuto potenciální energii, musíme v úseku toku vhodně soustředit jak spád, tak i průtok. Teoretický hydroenergetický potenciál lze vypočítat dle vzorce [5,8]:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \quad [\text{kW}; \text{m} \cdot \text{s}^{-2}; \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}; \text{m}] \quad (4.1)$$

, kde:

9,81 je gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

Q je průtok vodní turbínou [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

H je spád využívaný vodní elektrárnou [m]

Celý tento vzorec (4.1) v sobě již zahrnuje násobení konstantou měrné hmotnosti vody ($\rho=1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) a proto výsledný výkon již vychází v [kW].

Reálný výkon vodního toku však bude vždy menší než hodnota, která je stanovena ze vzorce (4.1) vlivem hydraulických ztrát, které vznikají samotným přívodem vody k turbíně, ztrát na turbíně, ztrát na převodu mezi hřídelí turbíny a generátoru (popřípadě na spojce) a konečně ztrát samotného generátoru.

Pro předběžný odhad dosažitelného výkonu se v našem případě (malé vodní elektrárny) použije přibližného vzorce:

$$P = (5 \text{ až } 7) \cdot Q \cdot H \quad [\text{kW}; \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}; \text{m}] \quad (4.2)$$

Pro náš případ vyjde předpokládaný výkon od vodního zdroje v dané lokalitě jako:

$$P = 6,0,9,2,2 = 11,88 \text{ kW} \quad (4.3)$$

Tento předběžný výkon ze vztahu (4.3) nyní zpřesníme výpočtem, ve kterém budou dosazovány účinnosti jednotlivých dílů udávané od výrobců.

Vodní turbínu volím Kaplanovu kašnovou turbínu s vodorovně uloženým hřídelem (S –turbína) a venkovní savkou s průměrem oběžného kola 570 mm (firma: Chlouba turbíny[21]). Výrobce udává jmenovité otáčky turbíny $n_1=470$ ot. /min. při spádu 2 m a hltnosti turbíny 850 l/s. Účinnost Kaplanovy turbíny je při této hltnosti a spádu $\eta_t = 80$ %.

Pro převod mechanické energie na elektrickou bude použit synchronní bezkartáčový 4 – pólový generátor (firma: TES Vsetín [28]) konkrétně v řadě GSH, typ GSH 180 S4. Bezkartáčové provedení se skládá z hlavního stroje, budiče, rotujícího usměřovače a elektronického regulátoru napětí. Generátor je určen pro samostatný (autonomní) provoz, nebo pro paralelní provoz se sítí. Výrobce udává účinnost $\eta_g = 83$ %, zdánlivý výkon 18,5 kVA, účiník 0,8 při $n_2=1500$ ot. /min.

Pro spojení rotujícího hřídele turbíny s generátorem se z důvodu požadovaných poměrně vysokých jmenovitých otáček generátoru používá převod do rychla. Pro náš případ volím použití klínového řemenového převodu, kterým lze realizovat převod až do 1:10. Hodnoty účinnosti se při této variantě dle výrobců řemenů a řemenic [23], pohybují v rozmezí $\eta_{př.} = (96$ až 98 %).

Hydroenergetický potenciál s přesnějšími hodnotami od výrobců jednotlivých součástí tedy bude:

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{př.} \quad (\text{kW}; \text{m} \cdot \text{s}^{-2}; \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}; \text{m}; -, -, -). \quad (4.4)$$

Po dosazení:

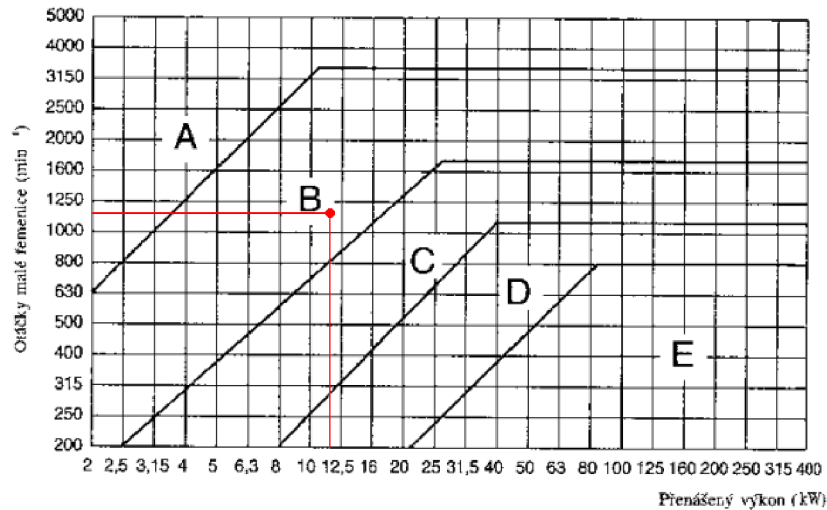
$$P = 9,81 \cdot 0,9,2,2,0,8,0,83,0,97 = 12,51 \text{ kW} \quad (4.5)$$

Tato hodnota odpovídá přibližně reálné hodnotě výkonu po realizaci celého systému. Ve skutečnosti se však může lišit o ztráty v ložiskách turbíny, generátoru a hydraulické ztráty.

Potřebnou velikost průměrů řemenic a průřezu řemene podle daných parametrů převodu určím dle [22]:

4.1.2 Stanovení minimálního výpočtového průměru řemenic

Z Obr. 13 nejdříve odečtu (vynesením otáček hřídele generátoru n_2 [ot. /min] a přenášeného výkonu P [kW] dle vztahu (4.3) do diagramu) velikost výpočtového průřezu řemene. Je-li volba velikosti řemene na rozhraní mezi dvěma průřezy, volím řemen s větším přenášeným výkonem (průřez B). Tomuto průřezu odpovídá dle [13] a Tab. 4 minimální výpočtový průměr řemenice $D_{2\text{MIN}}=125$ mm.



Obr. 13 Diagram určení potřebného průřezu klinového řemene[12]

Tab. 4 Minimální výpočtové průměry řemenic[12]

Průřez řemene	D_{MIN} [mm]
Z	63
A	90
B	125
C	200
D	355
E	500

4.1.3 Návrh výpočtových průměrů řemenic D_1 a D_2

Normalizovanou velikost průměru malé řemenice D_2 [mm] volím tak, aby platilo:

$$D_2 \geq D_{2MIN} \quad (4.6)$$

Z normalizovaných hodnot dle [13] a dle Tab. 5 vybírám hodnotu $D_2=132$ mm.

Tab. 5 Normalizované velikosti výpočtových průměrů řemenic[13]

Průřez řemene	Normalizovaný výpočtový průměr řemenice D [mm]
Z	(50), (53), (56), 60, 63, 67, 71, 75, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 150, 160, 180, 200, 224, 250
A	(75), (80), (85), 90, 95, 100, 106, 112, 118, 125, 132, 140, 150, 160, (170), 180, (190), 200, 224, 250, 280, 300, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, (800)
B	125, 132, 140, 150, 160, 170, 180, (190), 200, 224, 250, 280, 300, 315, 355, 375, 400, 450, 500, (530), 560, 600, 630, 710, 750, 800, 900, 1000, (1120)
C	200, 212, 224, 236, 250, 265, 280, 300, 315, (335), 355, 375, 400, 450, 500, (530), 560, 600, 630, 710, 750, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400, 1600
D	355, 375, 400, 425, 450, 475, 500, (530), 560, 600, 630, 710, 750, 800, 900, 1000, 1060, 1120, 1250, 1400, 1500, 1600, 1800, 2000
E	500, 530, 560, 600, 630, 670, 710, (750), 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400, 1500, 1600, 1800, 1900, 2000, 2240, 2500

Nyní vypočítám průměr velké řemenice D_1 [mm], která bude umístěna na hřídeli vodní turbíny:

$$D_1 = D_2 \cdot i \quad [mm; mm; -] \quad (4.7)$$

, kde:

D_2 je normalizovaný průměr malé řemenice [mm]

D_1 je normalizovaný průměr velké řemenice [mm]

i je převodový poměr [-] určený jako:

$$i = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1500}{470} = \mathbf{3,19} \quad [-] \quad (4.8)$$

D_1 potom vyjde:

$$D_1 = 132 \cdot 3,19 = \mathbf{421,08 \text{ mm}} \quad (4.9)$$

Tomuto průřezu odpovídá dle [13] a Tab. 5 normalizovaný průměr řemenice $D_1 = \mathbf{425 \text{ mm}}$.

4.1.3.1 Návrh osové vzdálenosti řemenic

Stanovení osové vzdálenosti je nutné vzhledem k případnému rozložení jednotlivých mechanických částí při výstavbě nové, či rekonstrukci staré strojovny malé vodní elektrárny.

Konečné délky uzavřených normalizovaných klínových řemenů omezují osovou vzdálenost.

Maximální osovou vzdálenost převodu volím podle vztahu (4.10), dle [12]:

$$A_{max.} = 2 \cdot (D_1 + D_2) = 2 \cdot (425 + 132) = \mathbf{1114 \text{ mm}} \quad (4.10)$$

Minimální osovou vzdálenost pak určím dle vztahu (4.11), dle [12]:

$$A_{min.} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (D_1 + D_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (425 + 132) = \mathbf{393,9 \text{ mm}} \quad (4.11)$$

Osovou vzdálenost A tedy volím v rozmezí:

$$A_{min.} \leq A \leq A_{max.} \quad (4.12)$$

Osovou vzdálenost volím $A = \mathbf{700 \text{ mm}}$

4.1.3.2 Určení délky řemene

Uzavřenou délku řemene L_p [mm], kterou je nutno stanovit z důvodu objednávky řemene, určím geometrickým výpočtem. Předběžnou geometrickou délku řemene L'_p [mm] vypočtu pomocí vztahu (4.13), dle [12]:

$$L'_p = 2 \cdot A \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{\pi}{2} \cdot (D_1 + D_2) + \frac{\pi \cdot \gamma}{180} \cdot (D_1 - D_2) \quad (4.13)$$

, kde:

α je úhel opásání hnací řemenice [°] stanovený dle [12], jako:

$$\alpha = 2 \cdot \arccos \left(\frac{D_1 - D_2}{2A} \right) = 2 \cdot \arccos \left(\frac{425 - 132}{2 \cdot 700} \right) = \mathbf{155,84^\circ} \quad (4.14)$$

γ je doplňkový úhel [°] stanovený dle [12], jako:

$$\gamma = 90 - \left(\frac{\alpha}{2}\right) = 90 - \left(\frac{155,84}{2}\right) = 12,08^\circ \quad (4.15)$$

Vyčíslení L'_p :

$$L'_p = 2.700 \cdot \sin \frac{155,84}{2} + \frac{\pi}{2} \cdot (425 + 132) + \frac{\pi \cdot 12,08}{180} \cdot (425 - 132) = 2305,71 \text{ mm} \quad (4.16)$$

Výpočtové délky řemene jsou normalizované dle [11]. Vypočtenou délku L'_p [mm] proto upravím na nejbližší normalizovanou výpočtovou délku L_P , které jsou uvedeny v Tab. 6.

Tab. 6 Normalizované výpočtové délky L_P [11]

Průřez řemene	Výpočtové délky L_P [mm] klínového řemene
Z	400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400, 1600, 1800, 2000, 2240, 2500
A	560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400, 1600, 1800, 2000, 2240, 2500, 2800, 3150, 3550, 4000
B	800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400, 1600, 1800, 2000, 2240, 2500, 2800, 3150, 3550, 4000, 4500, 5000, 5600, 6300
C	1800, 2000, 2240, 2500, 2800, 3150, 3550, 4000, 4500, 5000, 5600, 6300, 7100, 8000, 9000, 10000,
D	3150, 3550, 4000, 4500, 5000, 5600, 6300, 7100, 8000, 9000, 10000, 11200, 12500, 14000
E	4500, 5000, 5600, 6300, 7100, 8000, 9000, 10000, 11200, 12500, 14000, 16000, 18000

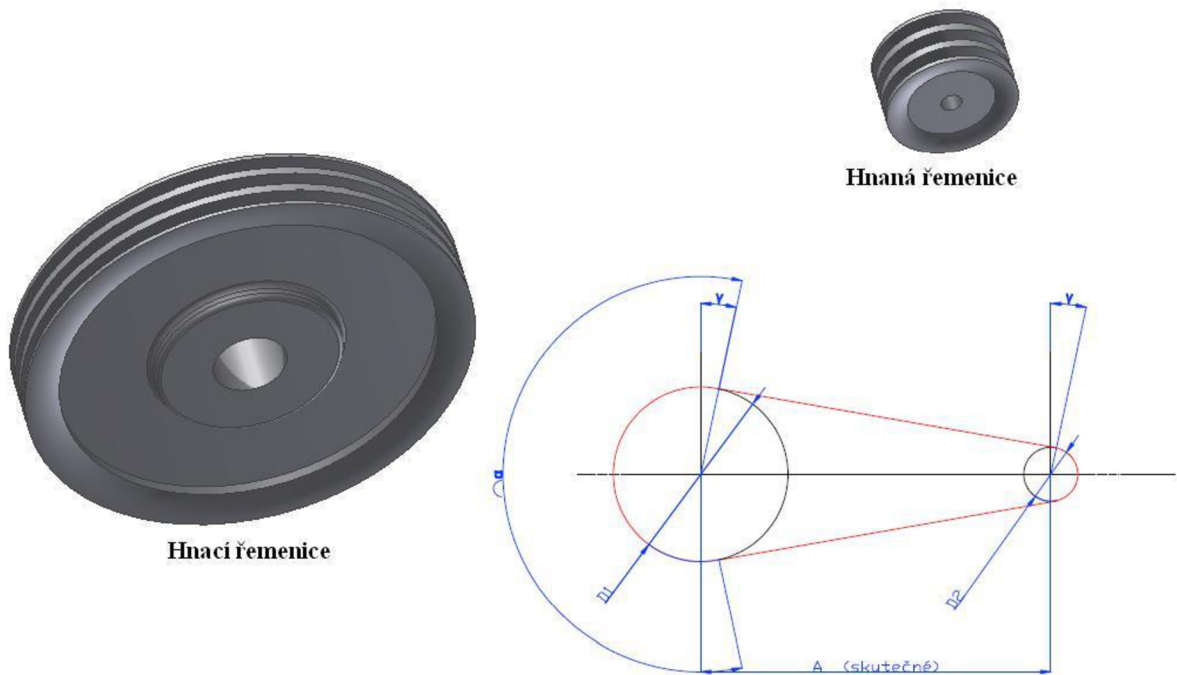
Z normalizovaných hodnot délek klínových řemenů volím nejbližší vyšší údaj, tedy **2500 mm**. Pro reálnou konstrukci samotného řemenového převodu však je nutné znát skutečnou hodnotu osové vzdálenosti řemenic, která bude odpovídat použití normalizované délky řemene. Ta se vypočte pomocí vztahu (4.17), dle [11] takto:

$$A_{skut.} = \frac{1,04 \cdot L_p - \frac{\pi}{2} \cdot (D_1 + D_2) - \frac{\pi \cdot \gamma}{180} \cdot (D_1 - D_2)}{2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (4.17)$$

Po dosazení bude hodnota $A_{skut.}$:

$$A_{skut.} = \frac{1,04 \cdot 2500 - \frac{\pi}{2} \cdot (425 + 132) - \frac{\pi \cdot 12,08}{180} \cdot (425 - 132)}{2 \cdot \sin \frac{155,84}{2}} = 850 \text{ mm} \quad (4.18)$$

Výsledné hodnoty jsem porovnal s profily vyráběných řemenic [23] a tyto řemenice nakreslil pomocí programu Autodesk Inventor na Obr. 14. Na tomto obrázku je zobrazeno i schéma celého převodu, na kterém jsou vyznačeny všechny důležité parametry pro celý výše uvedený výpočet.



Obr. 14 Profily řemenic a schéma k výpočtu délky klinového řemene

4.1.4 Návrh vyvedení výkonu

Výpočet průřezu vodiče od synchronního generátoru k hlavnímu domovnímu rozvaděči bude proveden pro uložení kabelu v zemi (referenční uložení D) a s údaji o generátoru udávanými výrobcem: $P=14,8$ kW, $\cos\varphi=0,8$, $U=400$ V, $\eta=0,83$. Vypočtený průřez bude pro kontrolu dimenzován i podle účinků zkratových proudů pro symetrický třífázový zkrat.

- 1) Dimenzování vodiče podle dovolené provozní teploty:

Dovolené proudové zatížení vodiče:

$$I_Z = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{14800}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,8 \cdot 0,83} = 32,17 \text{ A} \quad (4.19)$$

Jmenovité proudové zatížení vodiče pro referenční uložení D (ve vlhké hlinité půdě s měrným tepelným odporem $1 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$ v hloubce $0,7$ m):

$$I_N \geq \frac{I_Z}{k_1 \cdot k_2} \quad (4.20)$$

, kde: $k_1=1,12$ je přepočítávací součinitel pro okolní teplotu vzduchu odlišné od 30 °C
 $k_2=1,18$ je přepočítávací součinitel pro půdu s měrným tepelným koeficientem odlišným od $2,5 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{W}^{-1}$.

Jmenovité proudové zatížení tedy vyjde:

$$I_N \geq \frac{32,17}{1,12 \cdot 1,18} \Rightarrow I_N \geq \mathbf{24,34 \text{ A}} \quad (4.21)$$

Tomuto vypočtenému proudu, dle [15] odpovídá nejbližší vyšší jmenovité zatížení kabelu s PVC izolací a měděným jádrem o průřezu $3 \times 4 \text{ mm}^2$ – $I_n = 31 \text{ A}$ (CYKY 3x4), dle [24].

2) Dimenzování vodiče podle tepelných účinků zkratového symetrického proudu:

Tímto dimenzováním zjistíme, zda navržený průřez bude odolávat i průchodu zkratového proudu. Hodnota počátečního rázového zkratového proudu bude určena pro délku 20 m, při rezistivitě vodiče, dle [2] $\rho_{Cu} = 0,01786 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ a měrné reaktanci vodiče dle [2] $x_k = 0,06 \Omega \cdot \text{km}^{-1}$.

Odpor vodiče:

$$R = \rho_{Cu} \cdot \frac{l}{S} = 0,01786 \cdot \frac{20}{4} = \mathbf{0,0893 \Omega} \quad (4.22)$$

Reaktance vodiče:

$$X = x_k \cdot l = 0,06 \cdot 0,02 = \mathbf{1,2 \text{ m}\Omega} \quad (4.23)$$

Velikost impedance vodiče:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{0,0893^2 + (1,2 \cdot 10^{-3})^2} = \mathbf{0,0893 \Omega} \quad (4.24)$$

Počáteční souměrný rázový zkratový proud, dle [2]:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot |Z|} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0,0893} = \mathbf{2,845 \text{ kA}} \quad (4.25)$$

, kde:

c je napěťový součinitel pro výpočet zkratových proudů.

Pro stanovení minimálního průřezu, dle [2], je nutné stanovit velikost ekvivalentního oteplovacího proudu I_{k_g} . Pro jeho vyčíslení je nutné znát dobu zkratu, kterou volím s ohledem na použité ochrany $t = 0,1 \text{ s}$. Při této hodnotě je dle [9] součinitel k_g pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu za alternátorem roven $k_g = 1,5$.

Ekvivalentní oteplovací proud:

$$I_{k_g} = k_g \cdot I_k'' = 1,5 \cdot 2,845 = \mathbf{4,268 \text{ kA}} \quad (4.26)$$

Minimální průřez vodiče, který bude mít schopnost akumulovat teplo vzniklé průchodem zkratového proudu, aniž by jeho teplota překročila dovolenou teplotu při provozu, se dle [9] vypočte pomocí vztahu (4.27).

$$S_{min} = \frac{I_{ke} \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{\frac{c_0 \cdot (\vartheta_f + 20)}{\varrho_{20}} \cdot \ln \frac{\vartheta_f + \vartheta_k}{\vartheta_f + \vartheta_z}}} \quad (4.27)$$

, kde:

- S_{min} je minimální průřez vodiče [mm²]
- I_{ke} je ekvivalentní oteplovací proud [2] [A]
- t je doba zkratu [2] [s]
- c_0 je specifické teplo materiálu [2] [J/cm³/°C]
- ϑ_f je fiktivní teplota materiálu [2] [°C]
- ϑ_k je nejvyšší dovolená teplota při zkratu [2] [°C]
- ϑ_z je nejvyšší dovolená provozní teplota [2] [°C]
- ϱ_{20} je rezistivita materiálu při teplotě 20°C

Minimální průřez vodiče:

$$S_{min} = \frac{4268 \cdot \sqrt{0,1}}{\sqrt{\frac{8,5 \cdot (284,5 + 20)}{0,01786} \cdot \ln \frac{284,5 + 160}{284,5 + 70}}} = \mathbf{11,88 \text{ mm}^2} \quad (4.28)$$

Protože navrhovaný průřez vodiče **CYKY 3x4** nevyhověl kontrole na tepelné účinky, je nutné použít vodič alespoň **CYKY 3x16** pro vyvedení výkonu od generátoru.

4.1.5 Elektrické ochrany

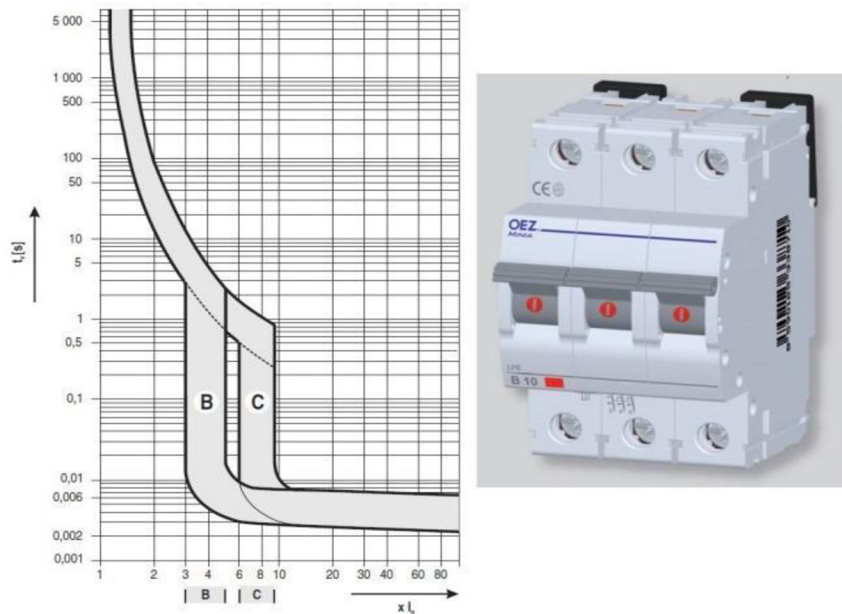
Každý generátor musí být, z důvodu ochrany proti jeho poškození vybaven elektrickými ochranami. Ty chrání nejen samotný generátor, ale i výstupní vedení před negativním působením generátoru při selhání regulátorů a obvodů automatiky. Použití elektrických ochran je v případě autonomního provozu nutné zejména z důvodu zajištění kvalitní dodávky elektrické energie pro samotný napájený objekt.

Domácí i zahraniční výrobci na trhu nabízí různé typy ochran různých cenových kategorií. Při výběru typu ochran je třeba si uvědomit, jak drahé zařízení se chrání a že se zároveň chrání i životy lidí. Na elektrických ochranách se nevyplácí šetřit zejména z toho důvodu, že ochrany vyšších cenových kategorií umožňují lepší možnosti nastavení, blokování, vyšší obsah informací o poruše apod.

Celá elektroinstalace bude obsahovat tyto elektrické ochrany:

- **Nadproudová ochrana**, která bude indikovat nadproud při překročení nastavené proudové hodnoty. Pro vlastní nadproudovou ochranu bude použit třífázový jistič, který obsahuje zkratovou i nadproudovou spoušť od firmy OEZ s.r.o. s označením LPE-25C-3 a vypínací charakteristikou C která je vhodná pro jištění elektrických obvodů se

zařizováními, která způsobují proudové rázy. Tento jistič je zobrazen i s jeho vypínací charakteristikou na Obr. 15.



Obr. 15 Jistič LPE-25C-3 s vypínací charakteristikou [26]

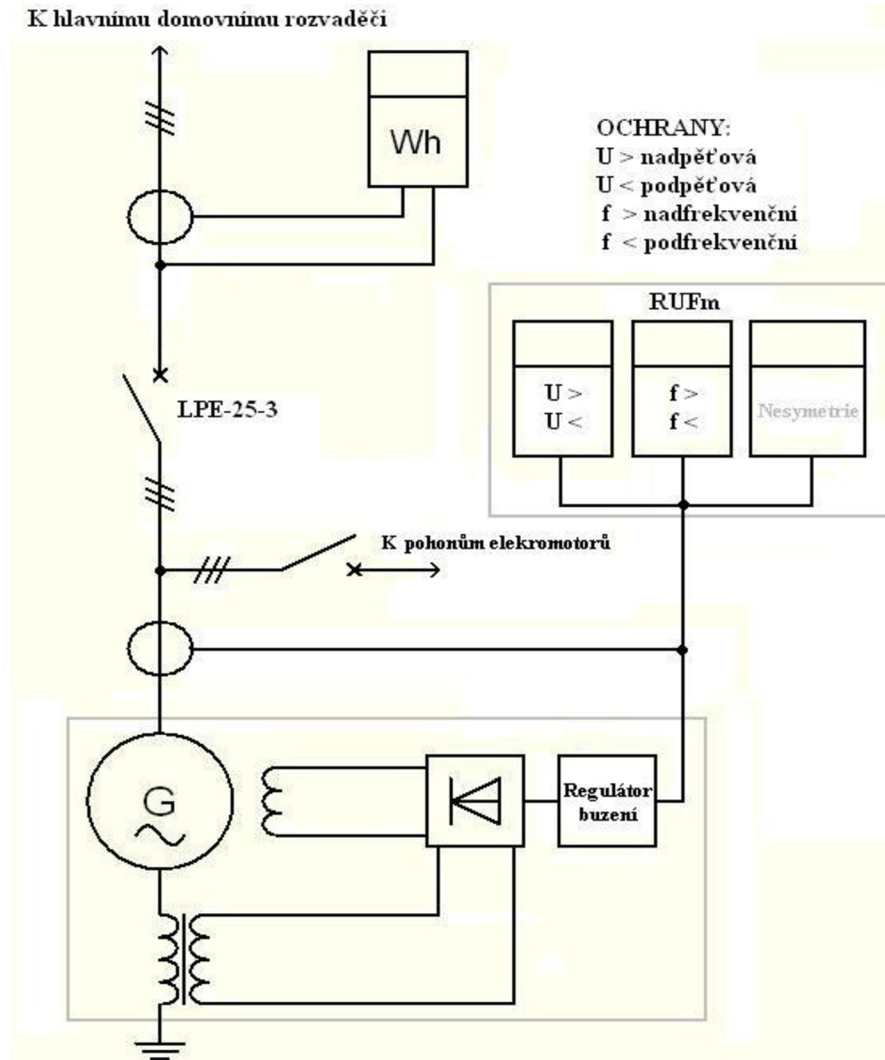
- **Napěťová ochrana**, která bude indikovat jak snížení napětí pod provozní hodnotu, tak i vznik přepětí na svorkách generátoru.
- **Frekvenční ochrana**, která bude sledovat případný vznik nadfrekvence i podfrekvence na svorkách generátoru.

Napěťová a frekvenční ochrana bude zabezpečena digitální třífázovou napěťovo-frekvenční ochranou RUFm od firmy PROTECTION & CONSULTING, s.r.o., která mimo jiné disponuje po nahrání příslušného softwaru i ochranou proti nesymetrickému zatížení, historií poruchových událostí, záznamníkem maximálních hodnot U [V] a f [Hz] a testem výstupních relé. Nastavení parametrů ochrany je uživatelsky přijatelné díky tomu, že se provádí pomocí displeje a tlačítek umístěných na předním panelu přístroje. Kteroukoli ochrannou funkci lze v případě nutnosti deaktivovat. Tato ochrana je znázorněna na Obr. 16.



Obr. 16 Napěťovo-frekvenční ochrana RUFm [25]

Celé schéma vyvedení výkonu z malé vodní elektrárny včetně zapojení použitých elektrických ochrany je znázorněno na Obr. 17.



Obr. 17 Schéma pro návrh vyvedení výkonu z malé vodní elektrárny

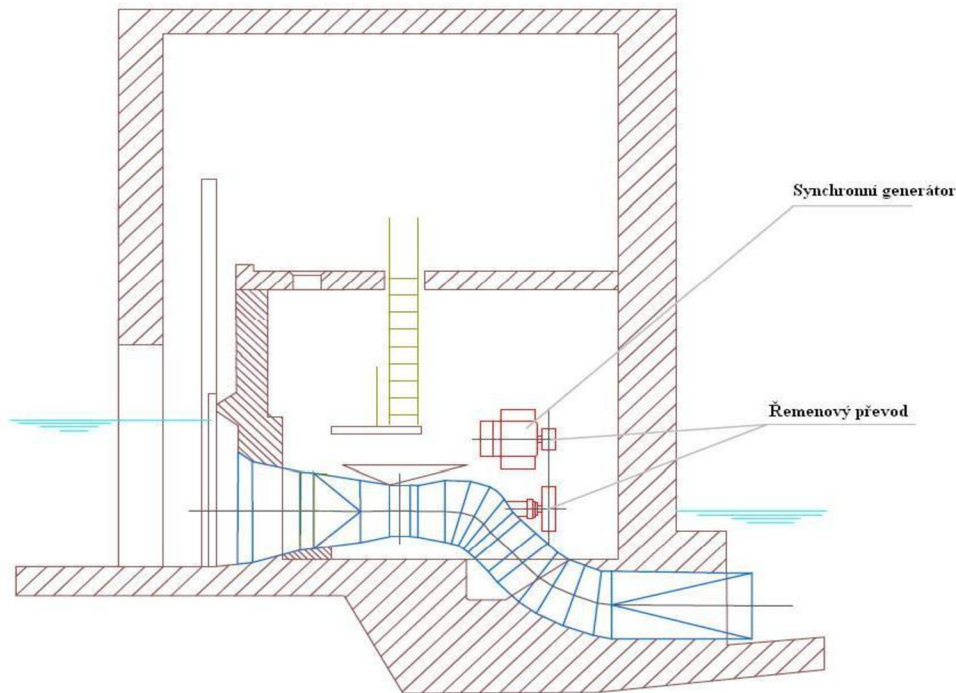
4.1.6 Stavební řešení malé vodní elektrárny

Stavební řešení celé malé vodní elektrárny výrazně ovlivňuje výsledné parametry elektrárny. Pro přivedení vody na oběžné kolo turbíny bude použit stávající náhon lichoběžníkového profilu. Pro regulaci a pokud možno rovnoměrné proudění vody je vhodné postavit na hranici náhonu a stávajícího jezu stavidlo, které by bylo nutné z důvodu vzdálenosti regulovat ručně. To bude zajištěno díky tomu, že objekt, který celá elektrárna bude napájet je celoročně obýván. Pro případné opravy přivaděče vody, turbíny a dalších částí umístěných na náhonu bude dále nutné nově postavit uzávěr vody na začátku náhonu, který může být využit i pro regulaci průtoku vody.

Přivaděč vody je opatřen stávajícími hrubými a jemnými česlemi, které bude nutno renovovat zbavením rzi a povrchovou úpravou. Čištění česlí bude prováděno z ekonomických důvodů

také ručně. Celý přivaděč je řešen, jako beztlakový nezakrytý. Z důvodu hustého porostu je vhodné část přivaděče řešit, jako zakrytý.

K umístění strojního a elektrotechnického zařízení bude nutné postavit novou budovu. Ta bude stát v místě, kde bývalo umístěno vodní kolo. Budova bude rozdělena na vrchní a spodní část, přičemž ve spodní části bude umístěna vlastní strojovna s turbínou, řemenovým převodem, synchronním generátorem. V horní části budovy potom bude zázemí pro obsluhu a dílna pro případné demontáže a opravy menšího charakteru. Řez touto budovou je vyobrazen na Obr. 18.



Obr. 18 Stavební řešení strojovny malé vodní elektrárny

4.2 Návrh kogenerační jednotky

Při návrhu kogenerační jednotky jsem vycházel z minimálního požadovaného elektrického výkonu pro napájení rodinného domu, který byl ve třetí kapitole stanoven na 11 kW. Na základě této hodnoty jsem vybral kogenerační jednotku typu ecoGEN-12AG od firmy COGENGREEN [27], která jako palivo využívá zemní plyn. Základní technické údaje této jednotky jsou pro přehlednost zapsány v Tab. 7.

Tab. 7 Technické údaje ecoGEN-12AG

Technické údaje ecoGEN-12AG			
Motor (FORD TSG 416)		Asynchronní generátor	
Počet válců	4	$\cos \varphi$	0,98
Otáčky	1500 ot/min	Otáčky	1500 ot/min
Max. výkon	15 kW při 1500 ot/min	Max. výkon	15 kVA
Tepelný systém			
Tepelný výkon systému		27 kW	
Teplota výstupní vody		80°C	
Max. teplota vratné vody		65°C	

Protože kogenerační jednotka je od výrobce osazena asynchronním generátorem a je určena pro paralelní provoz se sítí, bude nutno tento generátor zaměnit pro provoz v ostrovním (autonomním) režimu generátorem synchronním. Jako náhradu stávajícího generátoru volím synchronní generátor, který byl použit u návrhu malé vodní elektrárny. Pro tuto variantu tedy zůstává i návrh vyvedení elektrického výkonu, který byl popsán v kapitole 4.1.4.

Pro co nejefektivnější využití kogenerační jednotky je důležité zajistit pokud možno stálý odběr vyrobeného tepla i elektřiny. V tomto případě bude teplo z kogenerační jednotky celoročně využito pro ohřev vody ve venkovním bazénu a užitkové vody. V zimních měsících také pro ohřev vody k ústřednímu vytápění rodinného domu. K tomuto řešení bude nutné navrhnout tepelné výměníky s nádržemi. Protože je od výrobce stanovena maximální teplota vratné vody, bude nutné navrhnout i chladič, který bude zajišťovat to, aby teplota vody, která teče zpět do kogenerační jednotky, nepřekročila dovolenou hodnotu teploty. Pro výpočet požadovaného chladičového výkonu tohoto chladiče je zapotřebí stanovit jednotlivé odběry tepla z kogenerační jednotky.

4.2.1 Potřeba tepla na přípravu teplé vody

Předpokládaná denní potřeba tepla k přípravě teplé vody pro čtyřčlennou rodinu žijící v nově postaveném rodinném domě lze, dle [14] stanovit, jako:

$$Q_{TUV} = (1 + z) \cdot \frac{V_{TV/den} \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{TV} - t_{SV})}{3,6 \cdot 10^6} \quad (4.29)$$

, kde:

z je koeficient energetických ztrát systému, který je pro rozvody v nových stavbách roven 0,5.

$V_{TV/den}$ je celková potřeba teplé vody za jeden den. Uvažuje se 0,082 m³/osobu za den.

ρ je měrná hmotnost vody (1000 kg/m³).

c je měrná tepelná kapacita vody (4186 J/kg/K).

t_{TV} je teplota teplé vody (55°C).

t_{SV} je teplota studené vody (10°C).

Denní potřeba tepla pro ohřev teplé vody tedy bude:

$$Q_{TUV,d} = (1 + 0,5) \cdot \frac{4,0,082 \cdot 1000 \cdot 4186 \cdot (55 - 10)}{3600} = 25,7 \text{ kWh/den} \quad (4.30)$$

Roční potřeba tepla pro ohřev teplé vody se potom dle [16] určí takto:

$$Q_{TUV,r} = Q_{TUV,d} \cdot d + 0,8 \cdot Q_{TUV,d} \cdot \frac{t_{TV} - t_{SVI}}{t_{TV} - t_{SVZ}} \cdot (N - d) \quad (4.31)$$

, kde:

d je délka topného období pro danou oblast (pro oblast Třebíč-Bítovány je dle [16] stanoveno na 263 dní).

t_{TV} je teplota teplé vody (55°C).

t_{svl}	je teplota studené vody v létě (15°C).
t_{svz}	je teplota studené vody v zimě (5°C).
N	je počet pracovních dnů soustavy v roce (365 dní).

Roční potřeba tepla pro ohřev teplé vody tedy po vyčíslení bude:

$$Q_{TUV,r} = 25700.263 + 0,8.25700. \frac{55-15}{55-5} \cdot (365 - 263) = 8,44 \frac{MWh}{rok} = 30,384 \frac{GJ}{rok} \quad (4.32)$$

4.2.2 Potřeba tepla na vytápění

Dle [16] stanovím roční potřebu tepla takto:

$$Q_{VYT,r} = \frac{\varepsilon}{\eta_0 \eta_r} \cdot \frac{24 \cdot Q_c \cdot D}{(t_{is} - t_e)} \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} \quad (4.33)$$

, kde:

ε	je opravný součinitel. Pro stavby střední s krátkými otopnými přestávkami (noční útlum) lze zvolit $\varepsilon = 0,75$.
Q_c	je tepelná ztráta objektu. Dle projektové dokumentace $Q_c = 14,1 \text{ kW}$
D	jsou vytápěcí denostupně stanovené jako:

$$D = d \cdot (t_{is} - t_{es}) = 263 \cdot (19 - 4,1) = 3919 \text{ denostupňů}$$

, kde:

d	je délka topného období pro danou oblast (Třebíč)
t_{is}	je průměrná vnitřní výpočtová teplota. Pro obytnou budovu volím 19 °C.
t_{es}	je průměrná teplota během otopného období v dané oblasti.
η_0	je účinnost regulace soustavy, která se volí od 0,9 do 1.
η_r	je účinnost rozvodu vytápění, která se volí od 0,95 do 0,98 dle provedení.
t_{is}	je průměrná vnitřní výpočtová teplota. Pro obytnou budovu volím 19 °C.
t_e	je venkovní výpočtová teplota pro danou oblast. Pro tento případ je dle ČSN 38 3350 rovna $t_e = -15^\circ\text{C}$.

Roční potřeba tepla na vytápění tedy bude

$$Q_{VYT,r} = \frac{0,75}{0,95 \cdot 0,96} \cdot \frac{24 \cdot 14100 \cdot 3919}{(19 + 15)} \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} = 32,1 \frac{MWh}{rok} = 115,56 \frac{GJ}{rok} \quad (4.34)$$

Celková roční spotřeba tepla na vytápění a ohřev tedy bude:

$$Q_c = Q_{TUV,r} + Q_{VYT,r} = 40,54 \frac{MWh}{rok} = 145,944 \frac{GJ}{rok} \quad (4.35)$$

4.2.3 Výpočet zbytkového tepla v letním období pro ohřev vody v bazénu

Nyní stanovím zbytkové teplo v letním období, které zůstane k dispozici pro ohřev vody v nekrytém bazénu. Toto zbytkové teplo vypočtu, jako:

$$Q_{zb.} = Q_{KJ} - Q_{TUV} \quad (4.36)$$

, kde:

Q_{zb}	je zbytkové teplo, které bude dále použito k vytápění vody v bazénu.
Q_{KJ}	je teplo vyrobené kogenerační jednotkou.
Q_{TUV}	je teplo potřebné k přípravě teplé vody.

Po vyčíslení:

$$Q_{zb.} = \frac{97,2MJ}{h} - \frac{3,47MJ}{h} = 93,73MJ/h = 26,036 kW/h \quad (4.37)$$

Pro využití zbytkového tepla tedy navrhnu objem bazénu, ve kterém se toto teplo efektivně využije pro ohřev vody. Teplota výstupní vody z kogenerační jednotky je $t_2=80^\circ\text{C}$, maximální teplota vratné vody do kogenerační jednotky je rovna $t_1=65^\circ\text{C}$. Objem bazénu vypočtu, jako:

$$V = \eta \cdot \frac{Q_{zb}/24h}{\rho \cdot c \cdot (t_2 - t_1)} = 0,9 \cdot \frac{93,73 \cdot 10^6 \cdot 24}{1000 \cdot 4186 \cdot (80 - 65)} = 35,83m^3 \quad (4.38)$$

, kde:

η	je koeficient zahrnující teplotní ztráty v bazénu
$Q_{zb}/24h$	je zbytkové teplo pro období jednoho dne.
ρ	je měrná hmotnost vody (1000 kg/m^3).
c	je měrná tepelná kapacita vody (4186 J/kg/K).

Pro vlastní ohřev vody v bazénu bude využit tepelný výměník BOWMAN 40 Titan od firmy Výměníky s.r.o.

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ NAVRŽENÝCH ZDROJŮ

V této kapitole bude provedeno ekonomické zhodnocení obou variant navržených zdrojů z hlediska velikosti pořizovacích cen a doby návratnosti.

5.1 Ekonomické zhodnocení provozu malé vodní elektrárny

Pořizovací náklady na jednotlivé součásti malé vodní elektrárny jsou pro přehlednost uvedeny v Tabulce 8.

Tab. 8 Pořizovací náklady malé vodní elektrárny

Stavební úpravy		
Název součásti	Cena [Kč]	Poznámka
Vyčištění stávajícího náhonu	5 000	Odhad
Výstavba stavidla	15 000	Odhad
Výstavba uzávěru vody	15 000	Odhad
Renovace česlí	2 000	Odhad
Přívodní a odvodní potrubí	20 000	Odhad
Částečné zakrytí vodního přivaděče	20 000	Odhad
Výstavba strojovny	150 000	Odhad
Soustrojí malé vodní elektrárny		
Vodní turbína	920 000	Konzultováno s firmou Chlouba turbíny s.r.o.[21]
Elektrický generátor	120 000	Konzultováno s firmou TES s.r.o.[28]
Převody	8 000	Konzultováno s firmou Pikron s.r.o.[23]
Vyvedení výkonu a elektrické ochrany		
20 m vodiče CYKY 3x16	1 900	Konzultováno s firmou Draka kabely s.r.o.[24]
Nadproudová ochrana	283	Konzultováno s firmou OEZ [26]
Frekvenční a napěťová ochrana	15 000	Konzultováno s firmou PROTECTION&CONSULTING s.r.o.[25]
Souhrn		
Celkem	1 312 183	

K vyčíslení doby návratnosti využiji statické metody popsané v [4], u které je doba návratnosti investičního projektu daná počtem let, za které peněžní příjmy dosáhnou hodnoty počáteční investice, jinými slovy tedy dojde ke splacení. Jako peněžní příjmy budu dosazovat hodnotu peněz, které by byly zaplacený za dodávku elektrické energie distribuční společnosti E. ON. Tato částka byla ve výši 26 142 Kč za rok 2009 a byla odečtena z faktury k rodinnému domu, ve kterém žijí 4 osoby. Instalovaný výkon elektrických spotřebičů v tomto rodinném domě je stejný, jako uvádí Tab. 2.

Prostá doba návratnosti (PDN) tedy bude:

$$PDN = \frac{K_i}{zisk} = \frac{1\,312\,183}{26\,142} = \mathbf{50,2\ let} \quad (5.1)$$

, kde:

K_i je výše celkových pořizovacích nákladů.
 zisk je hodnota peněz, které by byly zaplacený za dodávku elektrické energie distribuční společnosti

Protože však metoda prosté návratnosti je statická a nepočítá s časovou hodnotou peněz, tedy se zdražováním, či zlevňováním elektrické energie, může být reálná hodnota doby návratnosti i kratší. Současně by mohlo být využito některé z dotací, které pro každý rok vypisuje Ministerstvo průmyslu a obchodu. V roce 2011 byla poskytnuta dotace na výstavbu, obnovu nebo rekonstrukci malé vodní elektrárny (program EFEKT [31]), která by pokryla až 40% uznaných nákladů, tedy v našem případě částku (Č):

$$\check{C} = 0,4 \cdot K_i = 0,4 \cdot 1\,312\,183 = \mathbf{524\,873\ Kč} \quad (5.2)$$

Při uvažování výše uvedené dotace by prostá doba návratnosti klesla na hodnotu:

$$PDN_{+dotace} = \frac{K_i - \check{C}}{zisk} = \frac{1\,312\,183 - 524\,873}{26\,142} = \mathbf{30,1\ let} \quad (5.3)$$

Při uvážení životnosti malých vodních elektráren, která se reálně pohybuje kolem 80 let i výše, jsou obě možnosti financování přijatelné a to i s ohledem na nutné provozní náklady.

5.2 Ekonomické zhodnocení provozu kogenerační jednotky

Pořizovací náklady na jednotlivé součásti potřebné ke správné funkci kogenerační jednotky v ostrovním provozu jsou uvedeny v Tabulce 9.

Tab. 9 Pořizovací náklady kogenerační jednotky

Název součásti	Cena [Kč]	Poznámka
Kogenerační jednotka ecoGEN-12AG	500 000	Odhad
Elektrický generátor	120 000	Konzultováno s firmou TES s.r.o.[28]
Tepelný výměník	18 000	Konzultováno s firmou Výměníky s.r.o.[30]
Kapalinový chladič	150 000	Odhad
Souhrn		
Celkem	788 000	

K posouzení návratnosti pořízení kogenerační jednotky využijí hodnoty peněz, které by majitel rodinného domu ročně zaplatil dodavateli elektrické energie a dodavateli zemního plynu. Z faktur pro rok 2009 byly odečteny tyto částky:

Cena elektrické energie za rok je 26 142 Kč (5,48 MWh, sazba D02d).
Cena za dodávku zemního plynu za rok je 34 215 Kč (1772 m³).

Kogenerační jednotka bude pro zajištění stálosti dodávky elektrické a tepelné energie v provozu 24 h denně. Výrobce zvolené kogenerační jednotky udává spotřebu zemního plynu pro různé stavy provozu kogenerační jednotky tak, jak udává Tabulka 10.

Tab. 10 Spotřeba zemního plynu kogenerační jednotky[27]

Kogenerační jednotka ecoGEN-12AG	
Spotřeba plynu při 100 % výkonu	4,8 m ³ /h
Spotřeba plynu při 50 % výkonu	3,3 m ³ /h
Spotřeba plynu při 25 % výkonu	1,4 m ³ /h

Spotřeba kogenerační jednotky bude závislá na požadovaném elektrickém výkonu. Nyní určím spotřebu zemního plynu při 25 % výkonu od kogenerační jednotky:

Roční spotřeba zemního plynu (výkon 25 %):

$$S = 1,4 \cdot 24 \cdot 365 = \mathbf{12\ 264\ m^3} \quad (5.4)$$

Tato spotřeba téměř sedminásobně překračuje spotřebu zemního plynu za rok 2009. Protože se však jedná o kogeneraci, je v této spotřebě započtena i cena, která by byla zaplácena za dodávku elektrické energie. Při uvažování ceny 19,3 Kč za 1 m³ zemního plynu vypočtu náklady za spotřebovaný zemní plyn v kogenerační jednotce:

$$N_{zp} = 19,3 \cdot 12\ 264 = \mathbf{236\ 695\ Kč} \quad (5.5)$$

V roce 2009 jsme však celkově za elektrickou energii a zemní plyn zaplatili:

$$N_e = 26\ 142 + 34\ 215 = \mathbf{60\ 357\ Kč} \quad (5.6)$$

Z výše uvedeného plyne, že provoz kogenerační jednotky bude z hlediska návratnosti této investice značně ztrátový a návratnost tedy nejde vyčíslit. Jistým řešením pro úsporu by mohlo být to, že bychom kogenerační jednotku neprovozovali 24 hodin denně, ale pouze v době od šesté hodiny ranní do desáté hodiny večerní, tedy 16 hodin. Po zbytek dne budou spotřebiče (lednička) a světelné okruhy napájeny ze soustavy baterie+měníč. Takové řešení by představovalo roční spotřebu zemního plynu (při 25 % výkonu):

$$S_{(16h)} = 1,4 \cdot 16 \cdot 365 = \mathbf{8\ 176\ m^3} \quad (5.7)$$

Náklady za využitý zemní plyn budou:

$$N_{zp(16h)} = 19,3 \cdot 8\ 176 = \mathbf{157\ 797\ Kč} \quad (5.8)$$

6 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá možným využitím různých přírodních zdrojů energie a jejich přeměnou na čistou elektrickou energii. Úvodní dvě kapitoly jsou zaměřeny na stručný přehled možných variant autonomních zdrojů, které by mohly být využity pro napájení rodinného domu elektrickou, případně tepelnou energií. Z tohoto přehledu je zřejmé, že všechny takové systémy využívají obnovitelné zdroje primární energie. Tato skutečnost je jednou z kladných vlastností těchto zdrojů. Nevýhodou této skutečnosti je však to, že celá výroba elektrické energie závisí na rozmarech počasí, a proto se u některých systémů musí využívat různých kombinací přeměn energie. Toto řešení je vždy spojeno s ekonomickým hlediskem celého systému, neboť je nutné investovat do rozsáhlejších úprav celkové zastavěné plochy a regulačních prvků.

Třetí kapitola je zaměřena na stanovení potřebného elektrického výkonu od autonomního zdroje tak, aby byla zajištěna dodávka elektrické energie pro modelový rodinný dům 4+1 se čtyřčlennou rodinou. Pro stanovení tohoto výkonu je zde uveden výčet všech instalovaných elektrických zařízení a také výčet elektrických zařízení, která mohou být současně v provozu. Z těchto hodnot byl určen součinitel náročnosti (soudobosti) a vlastní výkon, potřebný od autonomního zdroje elektrické energie.

Další kapitola se zabývá dvěma návrhy autonomních zdrojů pro rodinný dům. Z celého přehledu možných zdrojů byl vybrán návrh malé vodní elektrárny a návrh kogenerační jednotky, která jako palivo využívá zemní plyn. Malá vodní elektrárna by byla umístěna na náhonu bývalého vodního mlýna. Pro přeměnu energie vodního toku na mechanickou energii byla zvolena Kaplanova kašnová turbína s vodorovně uloženou hřídelí od firmy Chlouba turbíny. K přeměně mechanické energie na elektrickou by byl využit 4 - pólový synchronní generátor od firmy TES Vsetín. Pro přenos mechanického výkonu od hřídele vodní turbíny na hřídel generátoru je zde uveden výpočet klínového řemenového převodu, kde jsou stanoveny rozměry řemenic, osová vzdálenost řemenic a délka vlastního klínového řemene. Výpočet byl zkontrolován 2D nákresem v programu AutoCad. Dále je zde uveden návrh vyvedení elektrického výkonu od generátoru, kde byl výpočtem stanoven minimální průřez vodiče a výběr vhodných elektrických ochranných zařízení. Jako poslední jsou zde uvedeny nutné stavební úpravy na stávajícím náhonu a hrubý stavební návrh strojovny malé vodní elektrárny.

Druhá část této kapitoly se zabývá návrhem kogenerační jednotky, při kterém byla zvolena jednotka o elektrickém výkonu 15 kVA od firmy Cogengreen, která jako palivo využívá zemní plyn. Dále je zde výpočtem stanoveno potřebné teplo pro přípravu teplé vody, potřebné teplo pro vytápění a zbytkové teplo, které je dále využito pro celoroční vytápění bazénu o stanoveném objemu. K přenosu tepla od kogenerační jednotky do bazénu byl zvolen tepelný výměník od firmy Výměníky s.r.o.

V závěrečné, páté kapitole jsou pro přehlednost uvedeny pořizovací náklady obou variant návrhů autonomních zdrojů. Některé hodnoty byly získány přímo od výrobců jednotlivých zařízení, některé byly stanoveny odhadem. Z hlediska velikosti pořizovacích nákladů vychází ekonomicky výhodněji pořízení kogenerační jednotky. Z hlediska návratnosti investic však vychází lépe realizace malé vodní elektrárny, kterou jsem výpočtem stanovil na 50,2 let bez využití dotace pro rok 2011 a 30,1 let s využitím dotace.

Návratnost kogenerační jednotky, která jako palivo využívá zemní plyn, nebylo možné stanovit, protože tento provoz bude vždy ztrátový. Jistým řešením by byla výstavba zmiňované bioplynové stanice, která by tvořila zdroj paliva pro kogenerační jednotku. Příkladem tohoto řešení by mohla být zemědělská usedlost v horských oblastech, kde není možnost připojení k elektrorozvodné síti, a jako zdroj obživy je chov dobytka.

Použití autonomních zdrojů je dnes v praxi nejvíce využíváno na místech, kde není dostupnost stálé elektrorozvodné sítě, avšak pro velmi malé odběry elektrického výkonu. Příkladem je využívání fotovoltaických panelů pro 12 V nebo 24 V elektrický rozvod v rekreačních chatách, kde je tento systém využíván jen pro osvětlení, napájení přenosných televizorů, rádií apod. Se zvyšováním nároků (potřeba větších elektrických výkonů) roste i cena a složitost takového systému.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BEDNÁŘ JOSEF.: Malé vodní elektrárny 2- turbíny SNTL, nakladatelství technické literatury n. p., 1989.
- [2] BLAŽEK VLADIMÍR.: Distribuce elektrické energie, vydavatelství VUT v Brně, 2001.
- [3] BONNEFILLE ROBERT, ROBERT JACK.: Přímá přeměna energie SNTL, nakladatelství technické literatury n. p., 1977.
- [4] CHMELA MICHAL.: Ekonomika a řízení, vydavatelství VUT v Brně, 2007.
- [5] GABRIEL PAVEL, ČIHÁK FRANTIŠEK, KALANDRA PETR.: Malé vodní elektrárny, vydavatelství ČVUT, 1998.
- [6] JAROŠ JIŘÍ.: Větrné motory na Moravě EkoCentrum Brno ve spolupráci s Technickým muzeem v Brně, 1993.
- [7] KOLEKTIV AUTORŮ.: Obnovitelné zdroje energie, nakladatelství FCC PUBLIC s.r.o., 2001.
- [8] MATOUŠEK ANTONÍN.: Výroba elektrické energie, vydavatel VUT v Brně, 2007.
- [9] ORSÁGOVÁ JAROSLAVA.: Rozvodná zařízení, vydavatel VUT v Brně, 2009.
- [10] SRDEČNÝ KAREL.: Energeticky soběstačný dům – realita, či fikce?, vydavatelství ERA group spol. s.r.o., 2006.
- [11] ČSN 02 3110 Hnací klínové řemeny klasických průřezů. Základní rozměry a kontrolní metody, 1987.
- [12] ČSN 02 3111 Hnací klínové řemeny klasických průřezů. Výpočet převodu a předávaných výkonů, 1987.
- [13] ČSN 02 3180 - Řemenice pro klínové řemeny. Základní ustanovení. ČNI, Praha, 1970.
- [14] ČSN EN 15 316-3-1 až 3-3 Tepelné soustavy v budovách, 2008.
- [15] ČSN 33 2130 ed. 2 Elektrické instalace nízkého napětí – Vnitřní elektrické rozvody, 2009.
- [16] ČSN 38 3350 Zásobování teplem, všeobecné zásady, 6/1989.
- [17] Sluneční elektrárny [on - line],[citace 15.2.2011], dostupné z <http://www.solarenavi.cz/>
- [18] Energie vody [on-line], [citace 15.2.2011], dostupné z <http://www.energetickyporadce.cz/obnovitelne-zdroje/energie-vody.html>
- [19] Měření spádu [on-line], [citace 15.2.2011], dostupné z <http://mve.energetika.cz/>
- [20] Energie větru [on-line], [citace 20.2.2011], dostupné z <http://www.i-ekis.cz/?page=vitr>
- [21] Stránky výrobce vodních turbín [on-line], [citace 25.2. 2011], dostupné z <http://www.chloubaturbiny.cz/vyrobky.php?clanek=TG>
- [22] KVĚTOSLAV KALÁB.: Návrh, výpočet a montáž řemenového převodu [on-line], [citace 26.2.2011], dostupné z <http://www.347.vsb.cz/files/kal01/prirucka-remen.pdf>

- [23] Stránky výrobce řemenových pohonů [on-line], [citace 27.2. 2011], dostupné z <http://www.pikron.cz/>
- [24] Stránky výrobce elektrických kabelů [on-line], [citace 28.2. 2011], dostupné z <http://www.draka.cz/>
- [25] Stránky výrobce elektrických ochran [on-line], [citace 28.2. 2011], dostupné z <http://www.protection.cz/>
- [26] Stránky výrobce zařízení nízkého napětí [on-line], [citace 28.2. 2011], dostupné z <http://www.oez.cz/>
- [27] Stránky výrobce kogeneračních jednotek [on-line], [citace 1.3. 2011], dostupné z http://www.cogengreen.com/Micro-CHP/cogeneration_CHP.htm
- [28] Stránky výrobce elektrických generátorů [on-line], [citace 2.3. 2011], dostupné z <http://www.tes.cz/vyrobky/generatory-synchronni-gsh/>
- [29] Mapy Google [on-line], [citace 2.3. 2011], dostupné z <http://maps.google.cz/>
- [30] Stránky výrobce tepelných výměníků [on-line], [citace 8. 3. 2011], dostupné z <http://www.vymeniky.cz/files/vykres-40-Titan.pdf>
- [31] Katalog dotací [on-line], [citace 13. 4. 2011], dostupné z <http://www.edotace.cz/katalog-dotaci/male-vodni-elektrarny/doplnujici/>