

Martin Vojtek, Michal Kolcun

## Porovnanie rôznych prístupov pri návrhu autonómnych hybridných systémov pre rodinné domy

Tento príspevok sa zaoberá predovšetkým problematikou obnoviteľných zdrojov a efektivitou využitia nimi vyprodukovanej energie v off-grid hybridných systémoch s akumuláčnymi zariadeniami. Hlavná časť príspevku je venovaná porovnaniu dvoch prístupov pri návrhu rodinného domu v ostrovej prevádzke, ktorý pracuje na základe obnoviteľných zdrojov energie, presnejšie slnečnej energie samostatne a v spolupráci s energiou vetra. Za týmto účelom bol vytvorený model hybridného systému v programe Matlab/Simulink. Systémy navrhnuté odlišnými prístupmi boli následne pomocou modelu simulované a výsledky porovnané z hľadiska schopnosti pokryť zaťaženie počas simulovaného obdobia. Špecifické udalosti, ktoré nastávajú počas prevádzky takýchto systémov boli taktiež popísané, porovnané a vyhodnotené.

Keywords: obnoviteľné zdroje energie, akumulácia elektrickej energie, hybridné systémy,

### I. ÚVOD

V ostatných rokoch stúpila spotreba elektrickej energie v celosvetovom meradle. V súvislosti s nárastom spotreby teda narástol dopyt po elektrickej energii. Významnými faktormi sú najmä zvyšovanie počtu obyvateľstva, zvyšujúca sa životná úroveň a postupné zavádzanie elektrických vozidiel. Podstatná časť spotreby elektrickej energie je zabezpečovaná z fosílnych zdrojov, ktorých zásoby sa neustále znižujú, čo má za následok narastajúci význam obnoviteľných zdrojov energie [1].

Obnoviteľné zdroje energie v posledných rokoch zaznamenávajú výrazne narastajúce uplatnenie. V kontexte ich nerovnomernej a prerušovanej dodávky, naberá na význame riešenie spojené s akumuláciou elektrickej energie. Fundamentálna myšlienka tohto riešenia je nasledovná: V čase prebytku elektrickej energie z dôvodu výroby väčšej ako je zaťaženie sa elektrická energia transformuje do inej formy a ukladá pomocou akumuláčného zariadenia. Naopak v čase, keď obnoviteľné zdroje nevytvárajú dostatok energie, je energia spätne premieňaná do elektrickej formy za účelom pokrytia potrebnej časti zaťaženia. To vyžaduje použitie určitého typu akumuláčného zariadenia.

Obzvlášť ostrovné fotovoltaické systémy, ktoré sú predmetom tohto príspevku, sú závislé na vhodnom výbere technológie a kapacity akumulátora, pretože predstavuje jediný zdroj energie v dobe, keď systém žiadnu energiu neprodukuje [2].

Problém, ktorý je potrebné riešiť spočíva v optimálnom návrhu a voľbe veľkosti jednotlivých častí systému za účelom pokrytia záťaže počas celého roka a najväčšia výzva súvisí predovšetkým so spomínanou nerovnováhou medzi výrobou a spotrebou elektrickej energie. Dlhodobá nerovnováha sa prejavuje medzi jednotlivými ročnými obdobiami, typicky v lete je zaťaženie klasickej domácnosti nižšie ako v zime, pričom výroba fotovoltaických elektrární je opačná. Krátkodobá nerovnováha nastáva predovšetkým medzi dňom a nocou, kedy fotovoltaické elektrárne nevytvárajú.

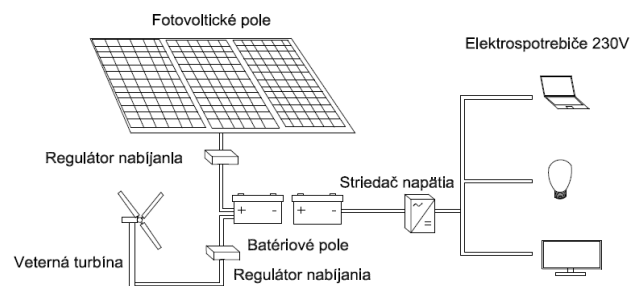
Nerovnováha medzi ročnými obdobiami a medzi dňom a nocou je hlavnou príčinou zložitosti návrhu. Prvky systému musia byť navrhnuté tak, aby bola zaistená požadovaná spoľahlivosť dodávky elektrickej energie. To spočíva v optimálnej voľbe veľkosti fotovoltaického zdroja a akumuláčného zariadenia. Fotovoltaický zdroj musí vyrobiť toľko energie, koľko je potrebné na pokrytie zaťaženia a zároveň akumuláčné zariadenie musí mať dostatočnú kapacitu na

presúvanie elektrickej energie v čase a v požadovanom množstve. Situáciu pri návrhu problematizujú aj odlišné klimatické podmienky v každej z navrhovaných lokalít, ktoré je potrebné poznať čo najpresnejšie.

V tomto príspevku sú ostrovné systémy navrhnuté dvoma spôsobmi. Celkovo sú ale simulované a vyhodnocované tri takéto systémy. Tretí z nich je totožný s prvým, ale navyše obsahuje aj malú veternú turbínu ako doplnkový zdroj. Okrem toho je uvedený aj popis modelu navrhnutého pre výpočet energetických a výkonových bilancií ostrovných systémov na báze slnečnej energie a vetra, ktorý bol použitý na simulácie a porovnanie navrhnutých riešení.

### II. NÁVRH OSTROVNÉHO SYSTÉMU PRE RODINNÝ DOM

Jednotlivé návrhy sa nelíšia spôsobom výpočtu, ale iba vstupnými dátami, použitými pre výpočet. Prvý návrh vychádza z celkovej priemernej ročnej výroby z fotovoltaickej elektrárne na jednotku inštalovaného výkonu a spotreby rodinného domu za rovnaké obdobie. Druhý systém je dimenzovaný na základe priemernej mesačnej výroby na jednotku inštalovaného výkonu počas mesiaca s najnižšou priemernou intenzitou slnečného žiarenia a spotreby za toto obdobie. Ako už bolo spomenuté, tretí simulovaný systém je navrhnutý totožne s prvým, avšak obsahuje aj malý doplnkový veterný zdroj.



Obr.1 Bloková schéma zapojenia hybridného systému

#### A. Vstupné dáta

Pred začatím návrhu fotovoltaického zdroja je potrebné získať dáta o priemernej intenzite slnečného žiarenia alebo o výrobe z fotovoltaických panelov vztiahnuté na jednotku inštalovaného výkonu. Na tento účel bol použitý internetový nástroj PVGIS [3] (Photovoltaic Geographical Information System) a jeho interaktívne mapy, kde je potrebné nastaviť požadované parametre vrátane

lokality. Výstupom je estimácia výroby fotovoltaickej elektrárne na jednotku inštalovaného výkonu spolu s priemernými hodnotami intenzít slnečného žiarenia pre jednotlivé dni a mesiace (Obr. 2), kde:

- Ed: Priemerná denná výroba elektrickej energie (kWh)
- Em: Priemerná mesačná výroba elektrickej energie (kWh)
- Hd: Priemerná denná intenzita slnečného žiarenia (kWh/m<sup>2</sup>)
- Hm: Priemerná mesačná intenzita slnečného žiarenia (kWh/m<sup>2</sup>)

Fixed system: inclination=35°, orientation=0°				
Month	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
Jan	1.01	31.2	1.19	36.8
Feb	1.79	50.2	2.15	60.1
Mar	3.30	102	4.12	128
Apr	3.96	119	5.17	155
May	4.10	127	5.50	170
Jun	4.05	121	5.49	165
Jul	4.01	124	5.49	170
Aug	4.10	127	5.58	173
Sep	3.27	98.1	4.30	129
Oct	2.40	74.5	3.04	94.1
Nov	1.36	40.9	1.66	49.8
Dec	0.76	23.6	0.90	27.9
Yearly average	2.85	86.6	3.72	113
Total for year		1040		1360

Obr. 2 Estimácia výroby fotovoltaickej elektrárne pomocou PVGIS

Zaťaženie uvažovaného rodinného domu predstavujú inštalované spotrebiče uvedené v nasledujúcej tabuľke. Zároveň sú uvedené aj doby ich prevádzky, ktoré boli pre účel návrhu iba odhadnuté. Reálny priebeh činného výkonu rodinného domu bude využívaný až následne, pri simulovaní navrhnutých systémov.

TABUĽKA. I  
Inštalovaný výkon a doba prevádzky spotrebičov

Zariadenie	Výkon P [W]	Čas prevádzky [h]
Sporák	2100	1
Práčka	900	0,28
Mikrovlná rúra	750	0,5
Žehlička	600	0,28
Rýchlovarná kanvica	600	0,25
Televízor	250	8
DVD prehrávač	150	2
PC	500	8
Svietidlá 15ks	600	5
<b>Spolu</b>	<b>6450</b>	-

Na základe týchto údajov je možné vypočítať odhadovanú spotrebu elektrickej energie rodinného domu pre jeden deň a následne pre celý rok, ako súčet súčinov inštalovaných výkonov a odpovedajúcich dób prevádzky.

$$E_{deň} = \sum_{i=1}^9 P_i * t_i = (2100 * 1) + (900 * 0,28) + (750 * 0,5) + (600 * 0,28) + (600 * 0,25) + (250 * 8) + (150 * 2) + (500 * 8) + (15 * 40 * 5) = 12\,345 \text{ Wh} \quad (1)$$

$$E_{rok} = E_{deň} * 365 = 12,345 * 365 = 4505,925 \text{ kWh} \quad (2)$$

### B. Fotovoltický zdroj

Získané dáta o spotrebe a jednotkovej výrobe fotovoltického zdroja sú potrebné pre návrh inštalovaného výkonu fotovoltaickej elektrárne. Inštalovaný výkon tohto zdroja zároveň predstavuje jedinou odlišnosť v prvých dvoch navrhnutých systémoch. Pri návrhu bol zvolený poly kryštálický kremíkový fotovoltický modul TW 225P POLY, produkt spoločnosti Tianwei s výkonom 225 W pri štandardných testovacích podmienkach. Inštalovaný výkon bol pre porovnávané systémy vypočítaný nasledovne:

- a) výpočet vychádzajúci z celkovej priemernej ročnej výroby fotovoltaickej elektrárne a ročnej spotreby

$$P_{pv} = \frac{E_{rok}}{E_{total}} = \frac{4505,925}{1040} = 4,33 \text{ kW} \quad (3)$$

$$n_{panelov} = \frac{P_{pv}}{P_{panel}} = \frac{4,33}{0,225} = 19,24 \text{ ks} \rightarrow 20 \text{ panelov} \quad (4)$$

- b) výpočet vychádzajúci z priemernej výroby počas mesiaca z najnižšou intenzitou slnečného žiarenia a mesačnej spotreby

$$P_{pv} = \frac{E_{rok}}{E_m} = \frac{4505,925}{12} = \frac{12}{23,6} = 15,91 \text{ kW} \quad (5)$$

$$n_{panelov} = \frac{P_{pv}}{P_{panel}} = \frac{15,91}{0,225} = 70,71 \text{ ks} \rightarrow 72 \text{ panelov} \quad (6)$$

- c) výpočet totožný s návrhom po a), výkon 4,33 kW, 20 ks panelov

### C. Veterný zdroj

Ako doplnkový zdroj bola zvolená malá veterná turbína s výkonom 400 W pri menovitej rýchlosti vetra 12 m/s, ktorá je uvažovaná iba v treťom navrhovanom systéme. Jej ďalšie technické parametre sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

TABUĽKA. II

Technické parametre veternej turbíny

Hmotnosť	22 kg
Priemer vrtule	1,5 m
Priemer rúrky stojanu	50 mm
Min. rýchlosť vetra	2,5 m/s
Napätie	12 V (DC)
Menovitý výkon	400 W
Max. rýchlosť vetra	45 m/s

### D. Akumulátory

Pri návrhu akumulátorov bola braná do úvahy požiadavka definujúca počet dní, počas ktorých musia byť schopné pokryť zaťaženie rodinného domu v prípade, ak nie je možná výroba elektrickej z obnoviteľných zdrojov, väčšinou z dôvodu nedostupnosti primárneho zdroja. Vzhľadom nato, akumulátory boli navrhnuté na základe dennej spotreby a definovaného počtu dní. V tomto prípade bola požiadavka stanovená na  $n_{dni} = 3$  dni bez napájania systému. Potrebná energia a množstvo elektrického náboja pre systém s napätím  $U_{sys} = 12 \text{ V}$  boli vypočítané nasledovne:

$$E_{aku} = E_{deň} * n_{dni} = 12,345 * 3 = 37,035 \text{ kWh} \quad (7)$$

$$Q_{aku} = \frac{E_{aku}}{U_{sys}} = \frac{37035}{12} = 3086 \text{ Ah} \quad (8)$$

V danom systéme sú uvažované akumulátory typu Banner Solar 12V/180 Ah. Dom bude potrebovať 18 akumulátorov zapojených paralelne, čím pokryje požadovanú kapacitu 3086 Ah pri napätí 12 V.

#### E. Ostatné časti

Do tejto kategórie spadajú prvky výkonovej elektroniky, teda najmä regulátor nabíjania domových batérií a menič napätia.

Ako regulátor dobíjania domových batérií bolo s ohľadom na veľkosti jednotlivých častí systému a ich parametre zvolené zariadenie s názvom 150/100-Tr od firmy Victron Energy. Toto zariadenie obsahuje algoritmus pre vyhľadávanie maximálneho výkonového bodu (Maximum Power Point Tracking - MPPT), a zároveň chráni pred vybitím, prebitím, činnosti obvodov v skrate, ale aj pred preťažením alebo obrátením polarizácie.

Spomedzi meničov napätia, ktoré vyhovovali navrhnutému systému bol zvolený SINUS Phoenix, 3000 VA, 12 V, taktiež od Victron Energy.

TABUĽKA. III

Zhrnutie hlavných parametrov systémov navrhnutých pre porovnanie

Návrh	Výkon fotovoltaického zdroja [kW]	Výkon veterného zdroja [kW]	Kapacita akumulátorov [kWh]
a)	4,33	-	37,035
b)	15,91	-	37,035
c)	4,33	0,4	37,035

### III. MODELOVANIE OFF-GRID HYBRIDNÉHO SYSTÉMU V PROSTREDÍ MATLAB/SIMULINK

Za účelom testovania navrhnutých off-grid systémov z pohľadu energetických a výkonových bilancií bol vytvorený model v prostredí Matlab/Simulink. Tomuto účelu odpovedajú aj použité zjednodušenia, najmä zanedbanie spínacích pochodov v prvkoch výkonovej elektroniky. Model predstavuje implementáciu jednotlivých častí bližšie popísaných v predchádzajúcej kapitole. Okrem toho, bolo potrebné definovať stavy systému v každom okamihu, vytvoriť a implementovať popis správania sa systému – jeho vnútornú logiku. Implementácia častí modelu je popísaná nižšie.

#### A. Fotovoltický zdroj

Bol modelovaný s využitím jedno diódového náhradného obvodu vrátane uvažovania sériového a paralelného odporu [4]. Výsledný prúd fotovoltaického modulu je na základe náhradného obvodu definovaný v (1).  $I_{PH}$  je fotovoltický prúd,  $I_S$  vyjadruje saturačný prúd,  $q$  je elektrický náboj,  $k$  je Boltzmannova konštanta a  $T$  je prevádzková teplota.

$$I = I_{PH} - I_S \left( e^{\left[ \frac{q(V+I \cdot R_S)}{kTA} \right]} - 1 \right) - \frac{(V + I \cdot R_S)}{R_{SH}} \quad (1)$$

Keďže výrobca neudáva hodnoty pre sériový ( $R_S$ ) a paralelný odpor ( $R_P$ ), ich hodnoty boli určené explicitne, na základe Lambertovej W-funkcie a estimácie faktora diódovej ideálnosti ( $A$ ). Všetky ostatné potrebné hodnoty boli nájdené v dátovom liste, ktorý je poskytovaný výrobcom. Okrem konštantných parametrov, ktoré je

potrebné nastaviť pred začatím simulácie, model pracuje so sľučným žiarením, teplotou a napätím ako vstupnými premennými. Merané hodnoty sľučného žiarenia a teploty sú jednoducho načítavané, kým hodnota napätia na strane fotovoltaického modulu sa mení a musí byť neustále prispôbovaná týmto podmienkam tak, aby bolo v každom čase využívané maximálne množstvo dostupnej energie. Za týmto účelom bol implementovaný dobre známy algoritmus pre vyhľadávanie maximálneho výkonového bodu s názvom Perturb and Observe (P&O). Pre každý z navrhnutých systémov bol nastavený príslušný počet panelov a odpovedajúca konfigurácia zapojenia.

#### B. Veterný zdroj

Za účelom výpočtu výstupného výkonu veternej turbíny bol zavedený model založený na rýchlosti vetra a parametroch veternej turbíny. Jedná sa o zjednodušenie modelu použitého autormi v [2]. Zjednodušenie spočíva v zanedbaní zmeny hustoty vzduchu v závislosti od tlaku. Energia dostupná vo vetre je definovaná nasledujúcou rovnicou.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

V tomto prípade, grécke písmeno  $\rho$  je hustota vzduchu (1,255 kg/m<sup>3</sup>),  $A$  je obsah kruhu, ktorý opisujú lopatky veternej turbíny a  $v$  reprezentuje rýchlosť vetra ako jedinú vstupnú premennú. Výkon dodaný veternou turbínou do hybridného systému je definovaný nasledovne:

$$P_{WP}(v) = \begin{cases} 0 & \text{if } v < v_{cut-in} \\ P_{wind} \cdot C_P & \text{if } v_{cut-in} < v < v_{rated} \\ 400 & \text{if } v_{rated} < v < v_{cut-off} \\ 0 & \text{if } v > v_{cut-off} \end{cases} \quad (2)$$

Ak je rýchlosť vetra nižšia ako rozbehová rýchlosť ( $v_{cut-in}$ ), turbína neprodukuje žiadnu energiu. Ak je rýchlosť vetra vyššia, ale zároveň nižšia ako menovitá rýchlosť ( $v_{rated}$ ), výkon dodávaný veternou turbínou je v tomto intervale rovný energii dostupnej vo vetre vynásobenej koeficientom efektivity turbíny ( $C_P$ ). 400 je hodnota menovitého výkonu turbíny vo wattoch, ktorý je dodaný v prípade ak rýchlosť vetra je v intervale medzi menovitou a maximálnou rýchlosťou ( $v_{cut-off}$ ). Ak je rýchlosť vetra vyššia ako maximálna, turbína je odstavená z dôvodu zamedzenia jej poškodenia, a teda dodávaný výkon je nulový.

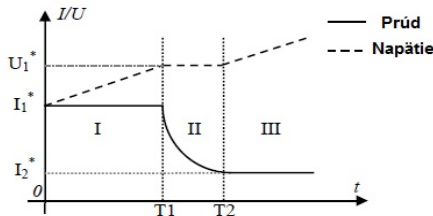
#### C. Batérie

V tomto prípade boli batérie modelované pomocou štandardného bloku z knižnice prostredia Simulink power systems. Model zahŕňa možnosť výberu typu batérie spomedzi štandardne používaných technológií. Zvolené boli oloveno-kyselinové batérie, pričom nebolo uvažované s ich sério-paralelným zapojením. Akumulátor bol modelovaný ako jedna veľká batéria s ekvivalentnou kapacitou a napätím.

#### D. Regulátor nabíjania a riadiaci systém

Regulátor nabíjania určený pre nabíjanie oloveno-kyselinových batérií pracuje v troch štádiách s ohľadom na zachovanie maximálnej životnosti akumulátorov. Bol implementovaný pomocou jednoduchých logických podmienok v závislosti na úrovni nabitia batérií. Princíp činnosti je znázornený na nasledujúcom obrázku.

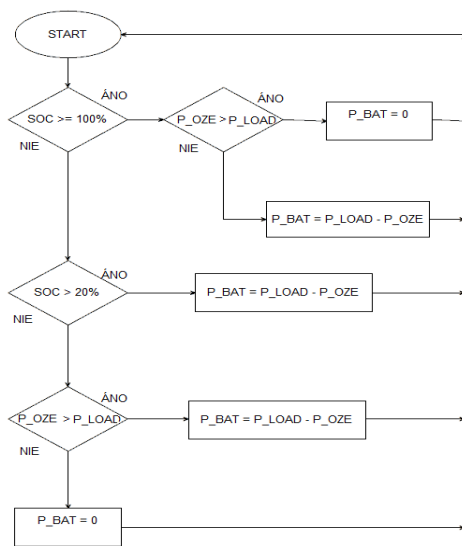
V prvej fáze je akumulátor nabíjaný maximálnym prúdom, ktorý je dostupný z obnoviteľných zdrojov, až do času  $T_1$  kedy je dosiahnutá preddefinovaná úroveň nabitia pre ukončenie tejto fázy. V druhom štádiu regulátor reguluje nabíjací prúd tak, aby hodnota napätia bola udržiavaná na konštantnej hodnote. V čase  $T_2$  nabíjací proces prechádza do 3 fázy, ktorá predstavuje dobíjanie malým konštantným udržiavacím prúdom spojené s miernym nárastom napätia až do dosiahnutia plného nabitia.



Obr. 3 Priebeh napätia a prúdu počas nabíjania v troch štádiách

Okrem logiky použitej pre nabíjanie v troch štádiách, regulátor zahŕňa aj MPPT algoritmus na báze techniky Perturb and Observe a riadiaci systém, ktorého úlohou je riadiť toky výkonov v rámci hybridného systému podľa definovaného algoritmu (obr. 4).

Hodnota SOC (State of Charge – úroveň nabitia) a porovnanie vyrábaného ( $P_{oze}$ ) a spotrebovávaného výkonu ( $P_{load}$ ) predstavujú základné rozhodovacie premenné. Porovnanie  $P_{oze}$  a  $P_{load}$  vypovedá o prebytku alebo nedostatku elektrickej energie v každom čase. Výstupom algoritmu je výkon batérií ( $P_{bat}$ ), pričom kladná hodnota predstavuje vybíjanie a naopak.



Obr. 4 Algoritmu použitý pre riadenie tokov výkonov

**E. Zatiaženie**

Model ponúka na výber spomedzi dvoch spôsobov, pomocou ktorých je možné modelovať a simulovať zatiaženie.

Prvý spôsob predstavuje individuálne modelovanie jednotlivých spotrebičov. To zahŕňa ich pripájanie na ideálny napäťový zdroj s ekvivalentným napätím striedača, nastavenie menovitého výkonu a času prevádzky (spínanie v určitých časoch) a následne meranie odoberaného činného výkonu pripojených spotrebičov. Meraná premenná ( $P_{load}$ ) potom vstupuje do riadiacej logiky systému. Druhý spôsob spočíva v priamom načítavaní priebehu činného výkonu z externého súboru do premennej  $P_{load}$ , ktorá má rovnaký účel ako v predchádzajúcom prípade.

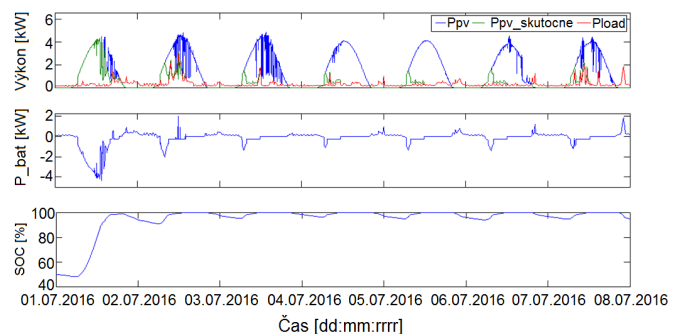
V tomto prípade bol využitý druhý popisovaný spôsob modelovania záťaže. Vstupné dáta boli merané pomocou inteligentného merania nasadeného v reálnej domácnosti a boli poskytnuté prevádzkovateľom distribučnej sústavy.

**IV. SIMULÁCIA A VÝSLEDKY**

Simulácie boli vykonávané pre každý z navrhnutých systémov počas letného a zimného týždňa. Konkrétne šlo o prvý júlový (1.7.-7.7.2016) a prvý decembrový týždeň (1.12.-7.12.2016), čomu odpovedajú dáta načítavané na vstupoch (slnéčné žiarenie, rýchlosť vetra, teplota, priebeh činného výkonu zaťaženia). Bola zvolená diskretná simulačná metóda s krokom 10 sekúnd a solver s názvom ode45 dordand-prince. Keďže cieľom bolo simulovať časové obdobie jedného týždňa, simulačný čas bol nastavený na hodnotu 604800 sekúnd.

**A. Systém navrhnutý na základe priemernej ročnej výroby a spotreby (systém a)**

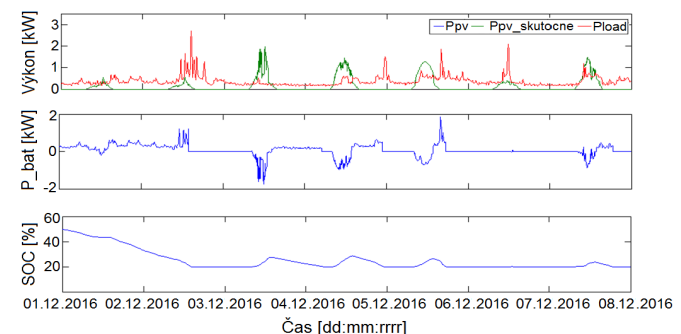
V letnom scenári je možné na základe energetickej a výkonovej bilancie vidieť prebytky energie vyrobenej z fotovoltaickej elektrárne. Prebytky boli ukladané, čo malo za následok zvyšovanie úrovne nabitia až na hodnotu 100% počas každého dňa. Pri tejto úrovni už nie je možné energiu ďalej akumulovať, regulátor nabíjania dodáva iba energiu potrebnú na pokrytie záťaže, čím viac ako dve tretiny dostupnej energie ostávajú nevyužité.



Obr. 5 Výkonová bilancia

TABUĽKA. IV  
Energetická bilancia

Veličina	Energia [kWh]
Energia dostupná z FV	238
Skutočná energia dodaná z FV	72,91
Energia dodaná do batérií	20,97
Zaťaž	51,95
Nedodaná energia	0



Obr. 6 Výkonová bilancia

TABULKA. V  
Energetická bilancia

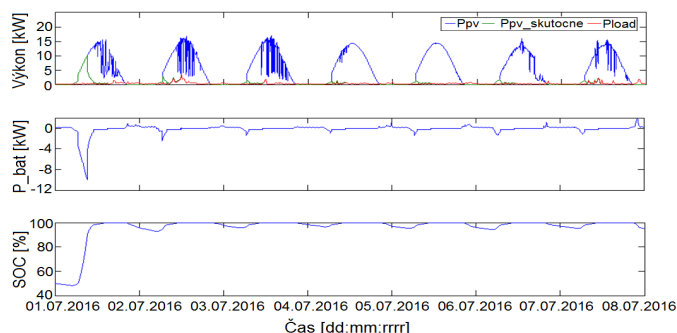
Veličina	Energia [kWh]
Energia dostupná z FV	25,37
Skutočná energia dodaná z FV	25,37
Energia dodaná z batérií	11
Záťaž	61,92
Nedodaná energia	25,54

Naopak, zimný scenár vykazuje maximálne možné využitie energie generovanej fotovoltaickou elektrárnou, avšak, množstvo energie nie je dostatočné na pokrytie záťaženia. Z toho dôvodu bola využitá akumulovaná energia až dokiaľ úroveň nabitia nedosiahla preddefinovanú minimálnu úroveň (20 %). Po tejto udalosti, prebytky vyrobenej elektrickej energie nastávali iba sporadicky, úroveň nabitia stúpala počas niekoľkých dní, maximálne však o 10 %. To neposkytovalo dostatočné množstvo energie na pokrytie záťaženia, a v praxi by to znamenalo, že tento systém odpojí záťaženie, čo poukazuje na nesprávne dimenzovanie jednotlivých častí.

Z energetickej bilancie vyplýva, že množstvo energie spotrebované zaťažением je väčšie ako v lete, a množstvo vyrobenej energie je menšie. Celkové množstvo energie, ktoré nebolo možné dodať kvôli nízkej alebo žiadnej výrobe z obnoviteľných zdrojov spolu s nedostatočným množstvom energie uložené v batériách, tvorí takmer polovicu z energie spotrebovanej zaťažением.

#### B. Systém navrhnutý na základe priemernej výroby a spotreby počas mesiaca s najnižšou intenzitou (systém b)

Letný scenár vykazuje extrémne veľké prebytky vyrábaného výkonu, ktoré dosahujú 10-15 násobok výkonu odoberaného zaťažением. To ma za následok rýchle nabitie batérií hneď počas prvého dňa. Pri maximálnej úrovni nabitia nebolo možné vyrobenú energiu skladovať, a preto v súvislosti s veľmi veľkými prebytkami je tento systém v lete neefektívny. Bolo využité iba menej ako 10 % dostupnej energie, čo stačilo na pokrytie záťaženia a nabitie batérií.



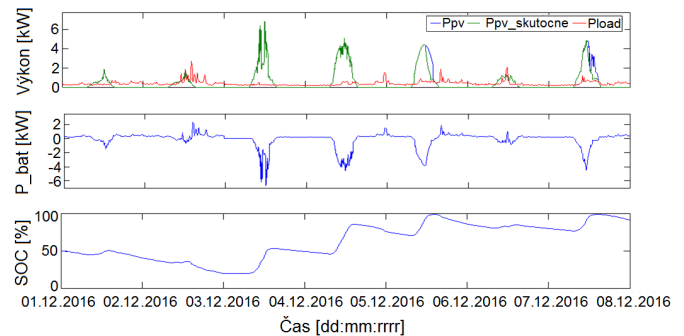
Obr. 7 Výkonová bilancia

TABULKA. VI  
Energetická bilancia

Veličina	Energia [kWh]
Energia dostupná z FV	833
Skutočná energia dodaná z FV	73,01
Energia dodaná do batérií	21,06
Záťaž	51,95
Nedodaná energia	0

Je možné vidieť, že v zimnom období tento systém vyrobí viac energie ako je spotrebované zaťažением. Aj napriek tomu nastal počas

prevádzky čas, kedy nebolo možné uspokojiť dopyt po elektrickej energii. Je to spôsobené výrobou z obnoviteľných zdrojov v inom čase ako je čas spotreby a zároveň nedostatočnou kapacitou batérií pre uloženie a následné presunutie energie v čase. Keďže týždeň začína na úrovni nabitia 50 % a končí s úrovňou nad 90 %, je možné predpokladať, že pri podobných poveternostných podmienkach by bolo zaťaženie v nasledujúcom týždni pokryté a systém by vyhovoval.



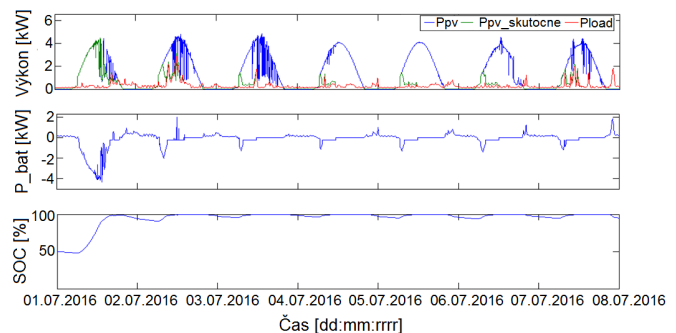
Obr. 8 Výkonová bilancia

TABULKA. VII  
Energetická bilancia

Veličina	Energia [kWh]
Energia dostupná z FV	88,8
Skutočná energia dodaná z FV	80,95
Energia dodaná do batérií	21,09
Záťaž	61,92
Nedodaná energia	2,056

#### C. Systém navrhnutý na základe priemernej ročnej výroby a spotreby doplnený o veternú turbínu (systém c)

V tomto prípade, je systém totožný z návrhom na priemernú ročnú výrobu a spotrebu doplnený o veternú turbínu. Preto je zaujímavé sledovať najmä zmeny v energetickej a výkonovej bilancii oproti prvému systému vplyvom prídania veternej turbíny.



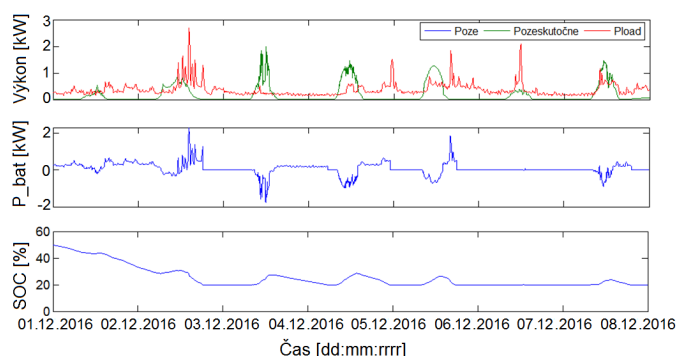
Obr. 9 Výkonová bilancia

TABULKA. VIII  
Energetická bilancia

Veličina	Energia [kWh]
Energia dostupná z FV	238
Energia dodaná z VT	3,269
Skutočná energia dodaná z OZE	72,91
Energia dodaná do batérií	20,96
Záťaž	51,95
Nedodaná energia	0

Na základe výkonovej bilancie je možné pozorovať výrobu z veternej elektrárne aj v noci. To vplýva pozitívne na znižovanie úrovne nabitia počas noci, čo znamená, že ďalší deň je disponibilný širší pracovný rozsah akumulátora. To je zásadná výhoda oproti prvému návrhu. Celkovo je ale príspevok k vyrobenej elektrickej energii malý, keďže veterná turbína ma výkon jednej desatiny výkonu fotovoltického zdroja.

Výsledky zimného scenára sú takmer totožné s prvým navrhovaným systémom. Veterná turbína v tomto období vyrobila 4,763 kWh elektrickej energie, čo nie je zanedbateľné aj napriek malému inštalovanému výkonu. S tým súvisí jediný rozdiel, ktorý spočíva v menšom množstve nedodanej energie, čím sa skrátí doba počas ktorej je systém bez napájania.



Obr. 10 Výkonová bilancia

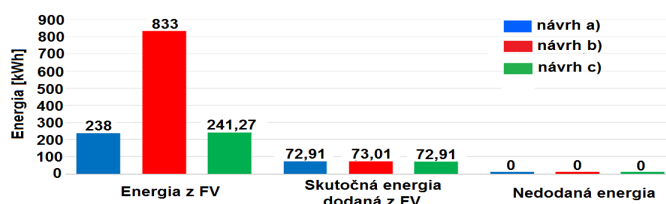
TABUĽKA. IX  
Energetická bilancia

Veličina	Energia [kWh]
Energia dostupná z FV	25,37
Skutočná energia dodaná z OZE	30,13
Energia dodaná z VT	4,763
Energia dodaná z batérií	10,92
Záťaž	61,92
Nedodaná energia	20,86

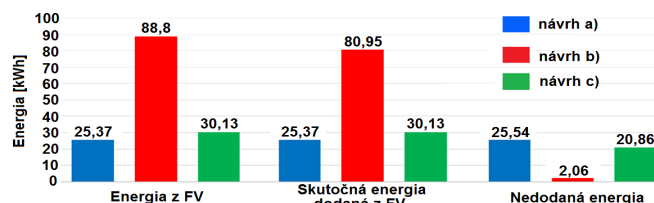
## V. DISKUSIA

Príspevok prináša posúdenie jednoduchých prístupov pri návrhu off-grid systémov pre rodinný dom z hľadiska schopnosti pokryť zaťaženie. Ukázalo sa, že žiaden s navrhovaných systémov nebol schopný úplne pokryť zaťaženie rodinného domu počas celého roka. Ako je možné vidieť, systémy založené na fotovoltických zdrojoch sú nedostatkové vo všetkých simulovaných zimných scenároch, aj napriek značnému predimenzovaniu v prípade b (obr. 12). Na druhej strane, v lete sú systémy dostatkové, ale vo všetkých prípadoch je dostupná energia využívaná neefektívne (obr. 11). Diverzifikácia zdrojov zavedením malej veternej turbíny do off-grid systému prináša výhody najmä v zimnom období.

Slabou stránkou vykonanej štúdie je porovnávanie navrhnutých systémov iba počas typického letného a zimného týždňa. Simulácie celoročnej prevádzky by poskytli podrobnejší obraz o správaní sa týchto systémov. Aj napriek tomu, toto porovnanie prináša viacero poznatkov, využiteľných pri návrhu v praxi. Príspevok okrem toho popisuje aj vytvorený simulačný model, ktorý môže byť využitý pre overenie správnosti navrhnutých systémov pred ich praktickou realizáciou, čo autori taktiež považujú za prínos v danej oblasti.



Obr. 11 Porovnanie energetických bilancií – letný scenár



Obr. 12 Porovnanie energetických bilancií – zimný scenár

## VI. ZÁVER

Po vykonaní predkladanej štúdie a jej analýze je možné vyvodit' nasledujúce závery. Žiaden z porovnávaných systémov nedokázal úplne pokryť zaťaženie. Zvolené prístupy teda nie sú vhodné pre návrh autonómnych off-grid systémov vyžadujúcich 100 % spoľahlivosť dodávky elektrickej energie.

Systém navrhnutý na priemernú ročnú výrobu a spotrebu vykazuje najvyššie množstvo nedodanej energie a teda najnižšiu spoľahlivosť. Tento prístup je teda vhodné použiť tam, kde sa užívateľ vyskytuje iba príležitostne. Naopak, systém navrhnutý na výrobu a spotrebu počas mesiaca s najnižšou intenzitou je najspoľahlivejší, ale nepotvrdil sa predpoklad, že ak je systém dimenzovaný na mesiac s najnižšou intenzitou slnečného žiarenia, bude automaticky schopný pokryť zaťaženie počas celého roka. Pre naplnenie tohto predpokladu, by bolo podobne ako v ďalších porovnávaných systémoch potrebné zvýšiť kapacitu úložiska. Veterný zdroj v treťom navrhnutom systéme má kladný vplyv na cyklovanie batérií a spoľahlivosť systému.

Okrem porovnania a príslušných záverov, je prínosom aj vytvorený model schopný vypočítať energetické a výkonové bilancie off-grid systémov založených na slnečnej a veternej energii.

## LITERATÚRA

- [1] M. Vojtek et al., "Utilization of energy storages in low voltage grid with renewable energy sources," *Proceedings of the 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Ostrava, Czech Republic, May, 2017.
- [2] J. Morávek, P. Mastný, J. Pitron, "Modeling the Energy Systems in Matlab Simulink - Problematics of Energy System Control," *Proceedings of the 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Ostrava, Czech Republic, May, 2015. s. 163-168.
- [3] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - Geographical Assessment of Solar Resource and Performance of Photovoltaic Technology [online]. Ispra, Italy: European Commission, Joint Research Centre. Dostupné na internete: < <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>>
- [4] M. Kolcun, M. Vojtek, Z. Čonka, "The implementation of an ideal photovoltaic module in Matlab/Simulink using simpowersystems toolbox," *16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Ostrava, pp. 579-583, May, 2015.

## ADRESY AUTOROV

Martin Vojtek, Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 04001, Slovensko, martin.vojtek@tuke.sk  
Michal Kolcun, Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, 04001, Slovensko, michal.kolcun@tuke.sk