

Dušan Medved', Michal Kolcun, Jaroslav Petráš, Rastislav Stolárik, Štefan Vaško

Návrh hybridnej fotovoltaickej elektrárne

Tento príspevok sa zaoberá návrhom hybridnej fotovoltaickej elektrárne z hľadiska skombinovania fotovoltaických modulov a ORC do jedného funkčného systému. V príspevku je uvedený popis zostavy experimentálneho fotovoltaického modulu a hybridnej fotovoltaickej elektrárne. Výsledky merania na experimentálnom hybridnom kolektore boli porovnané s výsledkami zo simulácií, ktoré boli realizované v programe ANSYS (nie sú uvedené v tomto príspevku).

Kľúčové slová: hybridná fotovoltaická elektráreň, Organický Rankinov cyklus, fotovoltaický článok, ANSYS

This paper deals with the design of a hybrid photovoltaic power plant in terms of combining photovoltaic modules and ORC into one functional system. In this paper, the experimental photovoltaic module and hybrid photovoltaic power plant is described. The results of the experimental hybrid collector measurements were compared with the results of the simulations that were carried out in the ANSYS program (not shown in this paper).

Keywords: hybrid photovoltaic power plant, Organic Rankine cycle, photovoltaic cell, ANSYS

I. ÚVOD

V dnešnej dobe sa hľadajú nové možnosti využitia energetických zdrojov, ktoré sa nachádzajú na zemi. Jedným z najväčších energetických zdrojov je slnečné žiarenie, ktoré pochádza zo Slnka. Súčasné využitie tejto energie je buď v podobe veľkých slnečných elektrární, na rozsiahlych plochách, alebo využitie fotovoltaických modulov na strechách alebo malých plochách. Tieto riešenia dosahujú svoje limity účinnosti z hľadiska použitých materiálov, technológií, ceny a plochy. Najväčším limitujúcim faktorom je doba žiarenia slnečnej energie, ktorá je závislá od polohy na zemi, ročnej doby a počasia. Preto sa hľadajú ďalšie technologické vylepšenia, ktoré by modifikovali limity účinnosti, t.j. vylepšenia z hľadiska použitia nových technológií, materiálov, podporných systémov, na zlepšenie doterajšej účinnosti.

II. POPIS JEDNOTLIVÝCH KOMPONENTOV HYBRIDNÉHO SYSTÉMU

Experimentálny hybridný, vzduchom chladený kolektor

Na stavbu *Experimentálneho hybridného vzduchom chladeného kolektora* boli použité, Obr. 2, Obr. 3:

- Fotovoltaický kolektor SY-55P s parametrami: menovitý výkon $P_m = 55$ W, menovité napätie $U_{mp} = 18$ V, menovitý prúd $I_{mp} = 3,06$ A s rozmermi $66 \text{ cm} \times 66 \text{ cm}$.
- Polystyrénové platne, ktoré boli narezávané na šírku 2 cm a výšku 3,5 cm a o dĺžke 4-krát 55 cm a 1-krát 50 cm.
- Plexisklo s rozmermi $66 \text{ cm} \times 66 \text{ cm}$ na uzavretie zadnej strany experimentálneho hybridného vzduchom chladeného kolektora. Bolo použité priesvitné plexisklo, aby bolo možné merať teplotu vzduchu na zadnej strane kolektora.
- Na utesnenie experimentálneho hybridného, vzduchom chladeného kolektora, bola použitá tesniaca pena. Bola upevnená taktiež priesvitnou lepiacou páskou na lepšie upevnenie plexiskla ku kolektoru.
- Chladenie experimentálneho hybridného kolektora bolo zabezpečené pomocou kompresora Condor MDR 2/11 s parametrami: napätie 250 V, prúd $I_{n1} = 16$ A, tlak 11 bar a výrobné číslo EN 60947, Obr. 1.



Obr. 1. Kompresor Condor MDR 2/11



Obr. 2. Fotovoltaický kolektor SY-55P použitý pri meraní



Obr. 3. Zadná strana fotovoltaického kolektora SY-55P

Komponenty hybridného systému

Hybridný fotovoltaický kolektor

Slniečny kolektor, ktorý bol použitý, je vodou chladený od firmy Anaf Solar. Kolektor s účinnosťou 15 %, plochou 1,65 m² s rozmermi 165×100 cm, hmotnosti 36 kg a maximálnej teplote 85°C. Maximálny tlak chladiacej kvapaliny v kolektore je 4 bar. Limitné údaje kolektora sú výkon na jeden meter štvorcový 1000 W·m² pri teplote 30°C a napätí 70 V. Parametre kolektora: maximálny výkon $P_{\max} = 230$ W, $U_{0c} = 36,8$ V a $I_{sc} = 8,34$ A. [2]

ORC cyklus

Charakteristika zariadenia:

Zariadenie sa týka jednotky ORC (Organický Rankinov cyklus). Jednotka ORC je určená pre výrobu elektrickej energie z nízko-potenciálnej tepelnej energie, ktorá sa nevyužíva, prípadne je likvidovaná ako odpadové teplo. Celé zariadenie sa skladá zo štyroch častí: turbogenerátora, výparníka, kondenzátora a obehového čerpadla.

Generátor elektrickej energie je jednosmerný a jednotka je doplnená o menič. Ako obehové médium sa používa chladivo R134a. Ide o bežnú látku určenú pre chladičové systémy. Toto chladivo sa taktiež používa v klimatizačných okruhoch automobilov a domácnostiach. [3]

Použitý ORC cyklus

ORC cyklus bol použitý od firmy IMB energo, s.r.o., K Lipinám 10, Praha 12 – Modřany, 143 00, Tab. 1.

TABUĽKA I
Základné parametre ORC [3]

Teplota (°C)	50
Tepelný príkon (kW)	625
Svorkový elektrický výkon (kW)	62,5
Vlastná elektrická spotreba (kW)	12,5
Elektrický výkon (kW)	50
Chladenie vzduchom (kW)	10
Chladenie vodou 25°C (kW)	48

Parametre sa ďalej dajú upravovať od predvolených (základných) podľa požiadavky objednávateľa ORC. Prevádzka tohto cyklu nevyžaduje zvýšené nároky na obsluhu zariadenia, ktoré netrpí častými výpadkami prevádzky, má dlhú životnosť a môže byť prevádzkované aj za sťažených podmienok, Obr. 4. [3]



Obr. 4. Poskladaný ORC [3]

Časti ORC cyklu

Turbogenerátor

Ide o špeciálnu tangenciálnu turbínu s axiálnym výstupom vlastnej konštrukcie. Turbína je spojená s generátorom cez vradenú planétovú prevodovku. Teleso turbíny je utesnené proti úniku chladiva. Generátor je spojený s turbínou a prevodovkou do jedného kompatibilného celku, Obr. 5. [3]



Obr. 5. Rotor turbíny [3]

Výparník a kondenzátor

Výparník a kondenzátor tvorí zostava doskových výmenníkov zo spoločným pripojením výmenníkov, Obr. 6.[3]



Obr. 6. Zváraný doskový výmenník [3]

Čerpadlo

Čerpadlo tvorí zostava čerpadiel s brodivým rotorom, v špeciálnom plynosťesnom prevedení. Výkon čerpadla je riadený podľa aktuálnej dodávky tepelnej energie, Obr. 7. [3]



Obr. 7. Čerpadlo s brodivým motorom [3]

Potrúbné prepojenie

Zariadenie bude na prevádzkyschopný celok pripojené oceľovým potrubím. Spoje potrubia budú vykonané zvaraním. Spoje budú doplnené o potrebné armatúry, ohyby, redukcie a napojenia. Všetky pripojené potrubia musia byť odolné voči cirkulačnému médiu R134a. [3]

Elektroinštalácie, MaR

Správna funkcia zariadenia bude sledovaná zariadením MaR s ovládacím panelom. Prívod a výstup elektrickej energie bude riešený cez centrálné silové rozvádzače. Celok bude doplnený sondami a kábovým prepojením. Rozvodná sústava: 3 PEN 50 Hz, 380V/TN-C ochrana nulovaním zvýšené pospájanie. [3]

Elektrická energia, vyvedenie elektrického výkonu

Pre privedenie elektrickej energie na rozbeh ORC modulu a vyvedenie elektrického výkonu slúži rozvádzač generátora RG. Rozvádzač bude oceľovo-plechový a bude určený pre vnútornú inštaláciu. Ovládacie a signalizačné prvky budú umiestnené na dverách rozvádzača. Stav prístrojov v rozvádzači budú prenášané do radiaceho systému. Rozvádzač bude mať nasledujúce hlavné vývody:

- vývod na generátor a bude vybavený:
 - motorovo ovládaným ističom
 - MTP
 - multimetrom s komunikáciou
- vývod pre vyvedenie vlastného výkonu
- vývod na rozvádzač vlastnej spotreby a bude vybavený:
 - poistkovým odpojovačom
 - MTP
 - multimetrom s komunikáciou

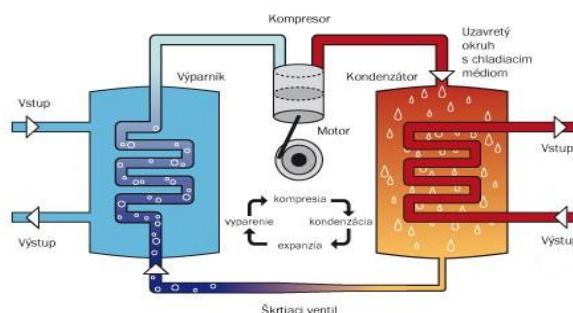
Výkonové parametre

Výkon jednotky je závislý od dodávaného výkonu, teploty, typu média, vratnej teploty. [3]

Tepelné čerpadlo

Tepelné čerpadlo sa bude využívať, keď teplota média, ktoré bude vstupovať do výmenníka pri ORC, nebude dostatočná. V trojcestnom ventilu sa prepne okruh a médium a privedie sa do tepelného čerpadla, ktoré zabezpečí dostatočnú teplotu na rozbeh a prevádzku ORC. Využívať sa to bude hlavne v jarnom a jesennom období roka a to hlavne z dôvodu predĺženia prevádzkovej doby ORC a kratšej návratnosti (investovaných nákladov).

Tepelné čerpadlo, použité v hybridnom systéme, je od firmy SPIRÁLA Tepelné čerpadlá produkt Spirála WW. Tento produkt je tepelné čerpadlo typu voda – voda. Sú v prevedeniach W10/W35 a W10/W50 a v radách od 05 do 55. Podľa prevedenia sa mení tepelný výkon, tepelný príkon, minimálny prietok pri 10°C, menovitý prietok, tlaková strata, minimálna vstupná teplota, prevádzkový prúd, hmotnosť. Maximálna výstupná teplota je 60°C a chladivo R407C pri napájaní 3/N/PE400V//50Hz. [4]

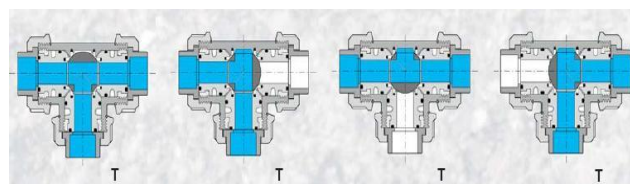


Obr. 8. Tepelné čerpadlo [1]

Ostatné komponenty hybridného systému

Trojcestný ventil so servom

Je to zariadenie, ktoré slúži na rozdeľovanie tekutiny alebo plynu, ktorý vchádza do ventilu ako AB označenie a potom sa môže rozdeliť na 2 okruhy, okruh A alebo okruh B, podľa toho, ktorý okruh je práve potrebný. Môže slúžiť tiež aj obráteným spôsobom a to tak, že zoberie z okruhu A a B pracovnú látku a následne ju spojí na výstupe z ventilu AB, Obr. 9.



Obr. 9. Trojcestný ventil so servom [1]

Obehové čerpadlo

Obehové čerpadlo bolo použité na cirkuláciu vody v systéme medzi fotovoltaickými článkami a zásobníkom teplej vody a druhé na cirkuláciu vody medzi zásobníkom teplej vody a výmenníkom, resp. tepelným čerpadlom.

V systéme bolo použité obehové čerpadlo WILO SMART A 25/4. Obehové čerpadlo energetickej triedy A, čerpadlo je zapojené na závit, pripojené na napätie 1 ± 30 V striedavého napätia, pri odchýlke $\pm 10\%$ a 50 Hz. Maximálny tlak je 10 bar, prístupná teplota okolia $+40^\circ\text{C}$ pri teplote čerpaného média od $+2$ do $+95^\circ\text{C}$. [5]

Zásobník na vodu

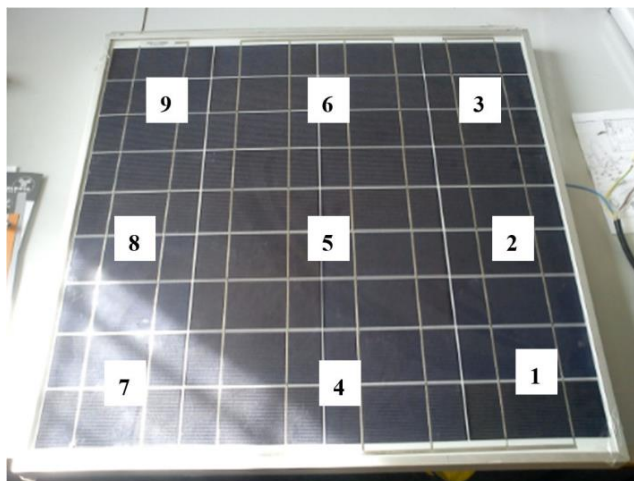
Použije sa zásobník na vodu od firmy Veelman VSBD 200L2, smaltovaný. Parametre zásobníka sú: objem 200 litrov, počet výmenníkov 2, prevádzkový tlak maximálne 6 bar, maximálna prevádzková teplota 90°C , výška 1 320 mm, priemer 590 mm a hmotnosť 109 kg. [6]

III. VÝSLEDKY MERANIA NA HYBRIDNOM SYSTÉME

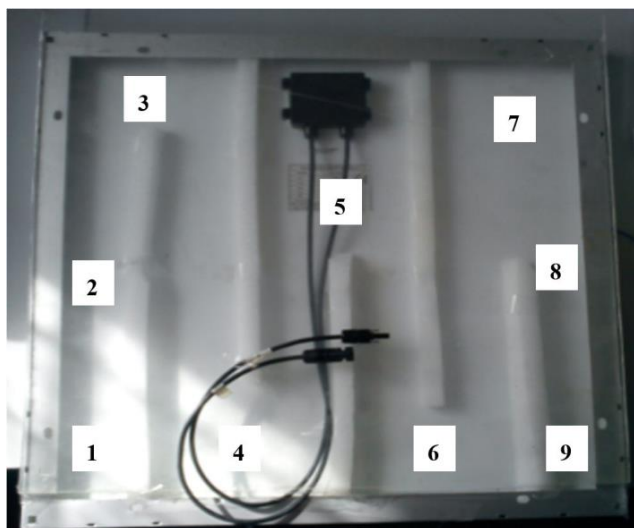
Postup merania

Meranie sa uskutočnilo vo vonkajšom prostredí. Zostrojený hybridný fotovoltaický kolektor bol osadený na podstavec vo výške 45 cm, pričom prednou stranou bol nasmerovaný do smeru žiarenia slnečných lúčov. Slnečný kolektor vystavený priamemu slnečnému

žiarieniu bol ponechaný vyhriať sa na najvyššiu teplotu, ktorá bola nameraná okolo 15. hodiny pri polooblačnej oblohe, teplote prostredia 22 °C pri miernom vetre. Teploty povrchu prednej a zadnej strany kolektora na vybraných miestach (Obr. 10 a Obr. 11), sú uvedené v tabuľke. Bolo merané aj výstupné napätie kolektora, ktoré je uvedené v tabuľke. Následne bol ochladzovaný priestor vytvorený medzi zadnou stranou kolektora a plexisklom, kompresorom, po dobu približne 1 minúty. Po ochladení bola znovu odmeraná teplota prednej i zadnej strany kolektora na vybraných miestach a tiež bola zaznamenaná výstupná hodnota napätia z kolektora, Tab. II a Tab. III.



Obr. 10. Konkrétne miesta na prednej strane kolektora, na ktorých boli merané teploty



Obr. 11. Konkrétne miesta na zadnej strane kolektora, na ktorých boli merané teploty

TABUĽKA II
Tabuľka nameraných hodnôt

Vybrané polohy na kolektore	Predná strana kolektora	Zadná strana kolektora	Predná strana kolektora	Zadná strana kolektora
	P_{pred} (°C)	Z_{pred} (°C)	P_{po} (°C)	Z_{po} (°C)
	Pred ochladením		Po ochladení	
1	40	31,6	38,8	30,9
2	42	32,6	39,6	31,4
3	40	35,2	40,2	32,8
4	45,2	32,6	40,8	32,2
5	47,4	38,2	44,6	36,6
6	48	35	45,6	34,4
7	45,3	38,4	39,8	36,4
8	47,4	36,4	41,4	33,5
9	48,4	35	42,2	34,4
Výstupné hodnoty napätia (V)	19		19	

TABUĽKA III
Tabuľka nameraných hodnôt

Vybrané polohy na kolektore	Predná strana kolektora	Zadná strana kolektora	Predná strana kolektora	Zadná strana kolektora
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
	Pred ochladením		Po ochladení	
1	36,6	28,6	31	27
2	38	29,8	33	28,2
3	38	31,4	33,4	28,2
4	40,2	28,8	37	27,8
5	41,4	34	38	30,4
6	42,8	31	40	28,4
7	38,8	34,12	36	32,4
8	40,4	33,4	37	30,6
9	41,4	31,2	38	30,6
Výstupné hodnoty napätia (V)	19		19	

Zhrnutie merania závislosti zvýšenia účinnosti od chladenia fotovoltaického kolektora

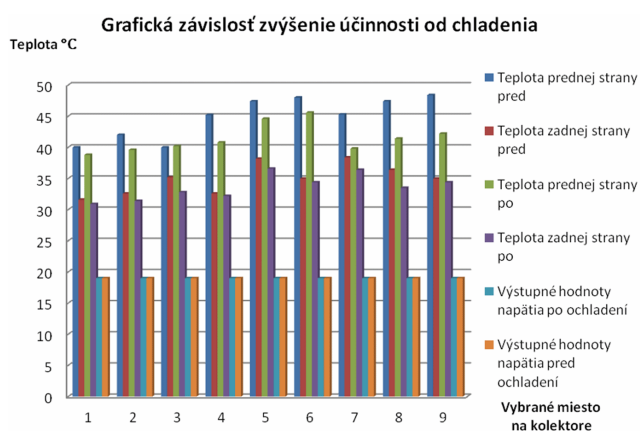
Hodnoty uvedené v tabuľke Tab. II, sú zobrazené do stĺpcového grafu na obrázku (Obr. 12), ktoré boli doplnené o výpočty z rovníc (1), (2) a (3). Rovnica (1) je aritmetický priemer hodnôt teplôt prednej strany kolektora z Tab. II pred ochladením s výsledkom merania výstupnej hodnoty napätia 19 V a rovnica (2) je aritmetický priemer hodnôt teplôt prednej strany kolektora po ochladení, kde bola zaznamenaná výstupná hodnota napätia 19 V. Posledná rovnica (3), je rozdiel teplôt rovníc (1) a (2), z čoho je zrejмый pokles teploty povrchu prednej strany kolektora. Došlo k poklesu teploty o 3,42°C, čím sa potvrdilo, že ochladenie článku na výrobu solárnej energie je možné, pričom nebolo zaznamenané pri takomto ochladení zvýšenie účinnosti, ako je to zaznamenané na Obr. 12. Pri poklese teploty o nameranú hodnotu, nedošlo však k zvýšeniu účinnosti. Toto by bolo možné dosiahnuť lepšou voľbou chladiaceho systému, predĺžením

doby chladenia kolektora a odstránením netesností v chladiacom systéme.

$$P_{Cpred1} = \frac{\sum_{n=1}^9 P_{pred1n}}{9} = \frac{40+42+42,4+45,2+47,4+48+45,33+47,4+48,4}{9} = 44,86^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

$$P_{Cpo1} = \frac{\sum_{n=1}^9 P_{po1n}}{9} = \frac{38,8+39,6+40,2+40,8+44,6+45,6+39,8+41,4+42,2}{9} = 41,44^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

$$P_{ROZDIEL1} = P_{Cpred1} - P_{Cpo1} = 44,86 - 41,44 = 3,42^{\circ}\text{C} \quad (3)$$



Obr. 12. Graf závislosti zvýšenia účinnosti od chladenia podľa Tab. II

IV. ZÁVER

Uvedený príspevok prezentuje výsledky návrhu hybridnej fotovoltickej elektrárne, pričom bol zároveň skúmaný a overovaný pokles účinnosti fotovoltických panelov pri narastajúcej teplote a nárast ich účinnosti pri chladení.

V simulácii fotovoltického hybridného kolektora chladeného vodným rúrkovým registrom o priemere 1,5 cm od firmy Anaf Solar boli nastavené hraničné parametre teploty prednej strany kolektora na 85°C. Výstupná hodnota teploty chladiaceho média z fotovoltického panelu je približne pri teplote 52,5°C. Médium s takýmto parametrom by bolo dostačujúce na rozbeh ORC jednotky, pričom pri započítaní strát pri výmene energie vo výmenníkoch a strát pri rozvoze média, by bola potrebná vyššia teplota na výstupe.

Meraním závislosti zvýšenia účinnosti od chladenia fotovoltického kolektora bola overovaná závislosť zvýšenia účinnosti od chladenia kolektora. Panel bol ochladený o teplotu 3,42°C, ale znížením teploty

kolektora o túto hodnotu sa nepodarilo v tomto prípade zvýšiť účinnosť panelu.

Pri vhodnej voľbe komponentov hybridnej fotovoltickej elektrárne by bolo možné i v praxi zostaviť takúto elektrárňu, pričom odpadové teplo odvedené z fotovoltických panelov by mohlo zabezpečiť energiu pre ORC. Pri spustení ORC by bolo možné 15%-nú účinnosť fotovoltických panelov zvýšiť o 8%-nú účinnosť z ORC.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Výskum charakteristík fotovoltických komponentov pre efektívne projektovanie solárnych systémov, s ITMS kódom: 26220220080, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ

LITERATÚRA

- [1] M. Ádám, „Návrh hybridnej fotovoltickej elektrárne“, (The design of hybrid photovoltaic power plant). Bakalárska práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2013.
- [2] Dansolar, „Anaf Solar High Energy (H-NRG)“, [online]. [cit. 2018-04-8]. Dostupné: < http://dansolar.dk/en/files/2014/04/brochure_HNRG.pdf >.
- [3] IMB energo s.r.o., „Zariadení ORC využívajúci energie o nízkej potenciáli o výkonu 10-100 kW“, [online]. Česká Republika Praha - Modřany. [cit. 2018-04-8]. Dostupné na internete: < http://imbenergo.cz/wp-content/gallery/jednotka_chlazení.pdf >.
- [4] Spirála tepelné čerpadlá, „Tepelné čerpadlá voda-voda SPIRÁLA WW“, [online]. Česká Republika, Nymburk. [cit. 2018-03-10]. Dostupné na internete: < <https://tepelna-čerpadla-spirala.cz/cenik> >.
- [5] Akoupelnyatopeni.cz, „Oběhové čerpadlo WILO SMART A 25/4“, [online]. Česká Republika. [cit. 2018-4-06]. Dostupné na internete: < <https://www.akoupelnyatopeni.cz/čerpadla-a-vodarny/usporna-čerpadla-tr-a/> >.
- [6] Domitex.sk, „Zásobník vody 200l Veelman VSB2 200L2 smaltovaný“, [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné na: < <https://www.domitex.sk/solarna-zostava-veelman-vsbd-200l2xvbp2m-bluetec-laser/> >.

ADRESY AUTOROV

doc. Ing. Dušan Medveď, PhD., Dr.h.c. prof. Ing. Michal Kolcun, PhD., doc. Ing. Jaroslav Petráš, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Másiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Dusan.Medved@tuke.sk, Michal.Kolcun@tuke.sk, Jaroslav.Petras@tuke.sk

Ing. Rastislav Stolarík, Ing. Štefan Vaško, VADIUM s.r.o., Plzenská 2, Prešov, Slovenská Republika, stolarik@vadium.sk, vasko@vadium.sk