

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor
v oboru

elektroenergetika

Jiří Erlebach

**Vliv vnějších podmínek a způsobu
instalace na funkci FV systémů**

Školitel: Prof. Ing. Jan Škorpil, CSc.

Datum státní doktorské zkoušky: 15. června 2009

Datum odevzdání práce: 31. května 2012

V Plzni, 2012

ANOTACE

Tato práce se zabývá zpracováním dat a analýzou FV systémů na budově Elektrotechnické fakulty Západočeské univerzity v Plzni, výpočtem optimálního úhlu instalace, zhodnocením naměřených a spočtených charakteristik a dalším možným směrem výzkumu.

KLÍČOVÁ SLOVA

fotovoltaický článek, solární panel, obnovitelné zdroje, účinnost měniče, spektrální charakteristika, teplotní charakteristika, fotoelektrický jev

ANNOTATION

The main purpose of this work is to analyze measured data from photovoltaic systems placed on the building of Faculty of Electrical Engineering in Pilsen, to figure out optimal inclination of installation, to evaluate measured and calculated characteristics and to set possible way of research.

KEY WORDS

photovoltaic cell, solar panel, renewable resources, converter efficiency, spectral characteristic, thermal characteristic, photoelectric effect

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Stav Problematiky	1
1.2	Cíle práce	1
2	Princip fotovoltaických článků – fotoelektrický jev	2
2.1	Úvod	2
2.2	Vysvětlení	3
2.3	Experimentální závěry fotoelektrické emise	4
2.4	Vlastní princip fotovoltaických článků	4
3	Přehled technologií fotovoltaických článků	5
3.1	První generace	5
3.2	Druhá generace	6
3.3	Třetí generace	7
4	Teplovní a spektrální charakteristiky fotovoltaických článků	8
4.1	Teplovní charakteristika	8
4.2	Spektrální charakteristika	9
5	Fotovoltaické systémy elektrotechnické fakulty	11
5.1	Fotovoltaický systém 20 kWp	11
5.2	Experimentální fotovoltaické systémy	12
5.2.1	Tegola	14
5.2.2	Pozicioner	15
5.2.3	Systém se třemi panely	16
5.2.4	Dva úhly	18

6	<i>Vlastní výzkum</i>	19
6.1	20 kWp FV systém – rok 2008	19
6.1.1	Naměřené hodnoty FV systému	19
6.1.2	Výpočet optimálního úhlu instalace FV systému a naměřené a vypočtené charakteristiky	21
6.1.3	Závěry z naměřených a vypočtených hodnot a charakteristik	21
6.2	Experimentální fotovoltaické systémy	28
6.2.1	Tegola, pozicioner a tři panely	28
6.2.1	Dva úhly	34
6.3	20 kWp FV systém – 1.2.2011 až 31.1.2012	37
6.4	Větrná elektrárna AeroCraft 500	40
7	<i>Závěr</i>	43
8	<i>Seznam literatury a zdrojů informací</i>	44
9	<i>Publikační činnost</i>	45
10	<i>Příloha – grafy v plné velikosti</i>	45

1 Úvod

Znalost vlivu vnějších podmínek a způsobu instalace na funkci fotovoltaických systémů je nezbytná k pochopení chování již instalovaných systémů a především ke správnému návrhu a realizaci systémů nových a to tak, aby byl daný systém co nejspolehlivější a dodával maximální množství elektrické energie při zachování příznivé ekonomické bilance.

1.1 *Stav Problematiky*

V ČR jsou nejvýznamnějšími obnovitelnými zdroji elektrické energie. Mezi ně patří zdroje vodní, větrné a sluneční. Vodní elektrárny jsou u nás již tradičním obnovitelným zdrojem, kdežto elektrárny větrné a sluneční se uplatňují až posledních několik let. Ne že by snad podmínky v ČR byly pro tyto zdroje ideální, to spíše naopak, dle mého názoru je pravým důvodem jejich rozmachu dotační politika EU a ČR. Jak jsem již zmínil, podnebí naší země nijak nenahrává masivnímu využití větrných a slunečních (fotovoltaických) elektráren (pomineme-li některé omezené lokality) v porovnání např. s pobřežím Norska či podnebím Španělska. Přesto, či právě proto musíme věnovat těmto zdrojům zvýšenou pozornost, jelikož jejich provoz není u nás tak jednoduchý, jak by se dalo na první pohled očekávat.

1.2 *Cíle práce*

Z již zmíněných důvodů jsem se zaměřil na provoz slunečních elektráren, konkrétně na provoz fotovoltaických systémů. Výzkum jsem se rozhodl realizovat na FV systémech elektrotechnické fakulty. Některé systémy byly modifikovány konkrétně pro tento výzkum. Došlo k instalaci nových FV systémů, změnil jsem úhly instalace některých aktuálních panelů, vytvořil jsem nový měřicí systém na platformě průmyslového počítače (s vyšší kapacitou měřených systémů), kde jsou zaznamenávána rovněž data z meteorologické stanice. Předmětem disertační práce je výzkum vlivů nejen klimatických, ale též způsobu instalace a provozu. Pro účely výzkumu bylo měření prováděno několik let a během této doby bylo zaznamenáno a vyhodnoceno nepřeberné množství dat.

2 Princip fotovoltaických článků – fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev je fyzikální jev, při kterém jsou elektrony emitovány z hmoty po absorpci energie z elektromagnetického záření (paprsků X, viditelného světla apod.). Emitované elektrony jsou někdy nazývány fotoelektrony, jev je také známý pod označením Hertzův efekt, vzhledem k jeho objeviteli (Heinrich Rudolf Hertz, r. 1887). Tento výraz se však nyní téměř nepoužívá.

Fotoelektrický jev vzniká po dopadu fotonů o energiích kolem několika málo elektronvoltů. Pokud má ovšem foton dostatečně vysokou energii, dochází k jevu zvanému Comptonův rozptyl (energie fotonu v řádu keV) či k tvorbě páru částice-antičástice, a to při energiích fotonů řádově v MeV. Studium fotoelektrického jevu výrazně přispělo k pochopení kvantového základu světla a formulaci vlnově-korpuskulárního dualismu. Tento jev se týká rovněž fotovodivostního, (fotokonduktivita a fotorezistivita), fotovoltaického a fotoelektrochemického jevu.

Pokud jev probíhá na povrchu látky, tzn. působením vnějšího elektromagnetického záření se elektrony uvolňují do okolí látky, hovoří se o vnějším fotoelektrickém jevu. Fotoelektrický jev však může probíhat i uvnitř látky, kdy uvolněné elektrony látku neopouští, ale zůstávají v ní jako vodivostní elektrony. V takovém případě se hovoří o vnitřním fotoelektrickém jevu.

2.1 Úvod

Pokud je kovový povrch vystaven elektromagnetickému záření s určitou nadprahovou frekvencí (typicky viditelné světlo), pak může být toto záření (světlo) absorbováno a vyzářen elektron. V roce 1902 Philipp Eduard Anton von Lenard zjistil, že jednotlivá energie emitovaných elektronů vzrůstá s frekvencí dopadajícího záření, což ovšem bylo v rozporu s Maxwellovou vlnovou teorií světla, která předpokládala, že energie elektronů bude úměrná intenzitě záření.

V roce 1905 vyřešil tento paradox Einstein vysvětlením, že je světlo tvořeno diskrétními kvanty, nyní nazývanými fotony, a ne spojitým vlněním. Na základě teorie Maxe Plancka o záření absolutně černého tělesa Einstein prohlásil, že energie každého kvanta světla je rovna frekvenci násobené konstantou, později nazvanou „Planckova“. Z toho vyplývá, že foton s nadprahovou frekvencí má dostatek energie k vyražení jednotlivého elektronu. Tento objev vedl ke kvantové revoluci ve fyzice a vynesl Einsteinovi v r. 1921 Nobelovu cenu.

2.2 Vysvětlení

Fotony světelného paprsku mají charakteristickou energii danou frekvencí světla. Při fotoelektrické emisi elektron uvnitř určitého materiálu absorbuje energii jednoho fotonu, čímž dojde ke zvýšení jeho energie nad velikost energie vazební, což způsobí jeho vyražení. Jestliže je ovšem energie fotonu příliš nízká, elektron není schopný materiál opustit.

Zvyšování intenzity světelného paprsku v něm zvyšuje počet fotonů, což má za následek zvyšování počtu emitovaných elektronů, ne však jejich vlastní energie. Z tohoto důvodu energie emitovaných elektronů nezávisí na intenzitě dopadajícího světla, ale pouze na vlastní energii fotonů. Toto platí ovšem do určité míry, kdy je intenzita dostatečně nízká a neuplatňuje se jev tzv. multifotonové absorpce.

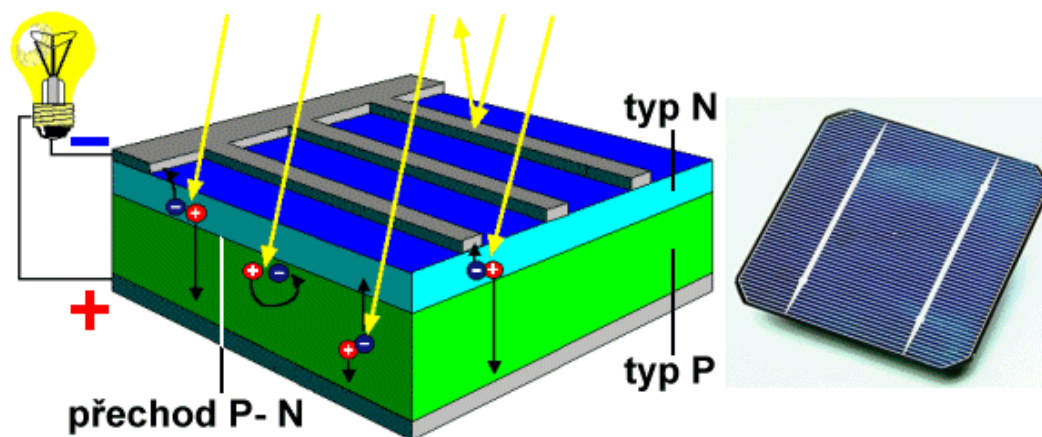
Elektrony mohou při ozáření absorbovat energii fotonů, jev je ovšem diskrétní, tzn. že veškerá energie jednoho fotonu buď musí být pohlcena a použita k vymanění elektronu z atomové vazby nebo je tato energie emitována zpět. Jestliže je energie fotonu absorbována, pak je její část použita k uvolnění elektronu z atomu a zbytek se podílí na kinetické energii elektronu jako volné částice: $hf = \Phi + E_{k \max}$, kde $\Phi = hf_0$, f_0 - prahová frekvence.

2.3 Experimentální závěry fotoelektrické emise

Pro daný kov a frekvenci dopadajícího záření je rychlost, s jakou jsou fotoelektrony vyráženy, přímo úměrná intenzitě dopadajícího světla. Dále pro daný kov existuje určitá minimální frekvence dopadajícího záření, pod kterou k fotoelektrickému jevu nedochází. Tato frekvence se nazývá prahová. Nad touto prahovou frekvencí je maximální kinetická energie vyraženého elektronu nezávislá na intenzitě dopadajícího světla, ale závisí na jeho frekvenci. Časová prodleva mezi dopadem záření a emisí elektronu je velmi malá, typicky pod 1 ns.

2.4 Vlastní princip fotovoltaických článků

Jednoduchý fotovoltaický článek je ve své podstatě tvořen polovodičovou diodou. Základem je tenká křemíková destička s vodivostí typu P, na níž je při výrobě nanášena tenká vrstva polovodiče typu N. Obě vrstvy jsou tedy odděleny P-N přechodem a jsou k nim připojeny elektrody. Po dopadu světla dochází v polovodiči k vnitřnímu fotoelektrickému jevu a tedy k uvolňování elektronů z krystalové mřížky polovodiče. Na přechodu P-N vznikne napětí odpovídající energii zakázaného pásma, u křemíkových článků kolem 0,5 V. Dojde-li k připojení zátěže k elektrodám, začnou se kladné a záporné náboje vyrovnávat – obvodem začne procházet elektrický proud. Fotovoltaické panely jsou tvořeny množstvím sériovo-paralelně propojených fotovoltaických článků.



Obr. 1 – Princip fotovoltaického článku

3 Přehled technologií fotovoltaických článků

Technologie fotovoltaických článků můžeme dělit dle několika kritérií, např. dle použitých polovodičů, dle jejich struktury či dle generace. Technologie běžně používaných fotovoltaických článků jsou obecně známy a nemá většího významu se jimi podrobně zabírat.

3.1 První generace

Články první generace jsou obvykle zařízení s relativně velkou plochou, vysokou kvalitou zpracování a jedním přechodem. Jejich výroba vyžaduje vysoké nároky, jak energetické, tak i nároky na pracovní sílu, což znemožňuje širší omezení výrobních nákladů. Účinnost jednopřechodových křemíkových článků se přibližuje (laboratorně) teoretickému limitu 33 % a jejich ekonomičnost je na úrovni výroby energie z fosilních zdrojů s dobou návratnosti 5-7 let. Předpokládá se, že jejich cena nepoklesne pod 1 USD/W. Do této generace spadají běžně používané amorfní, polykrystalické a monokrystalické fotovoltaické panely.



Obr. 2 – Zástupci první generace článků, zleva: monokrystalický, polykrystalický

3.2 Druhá generace

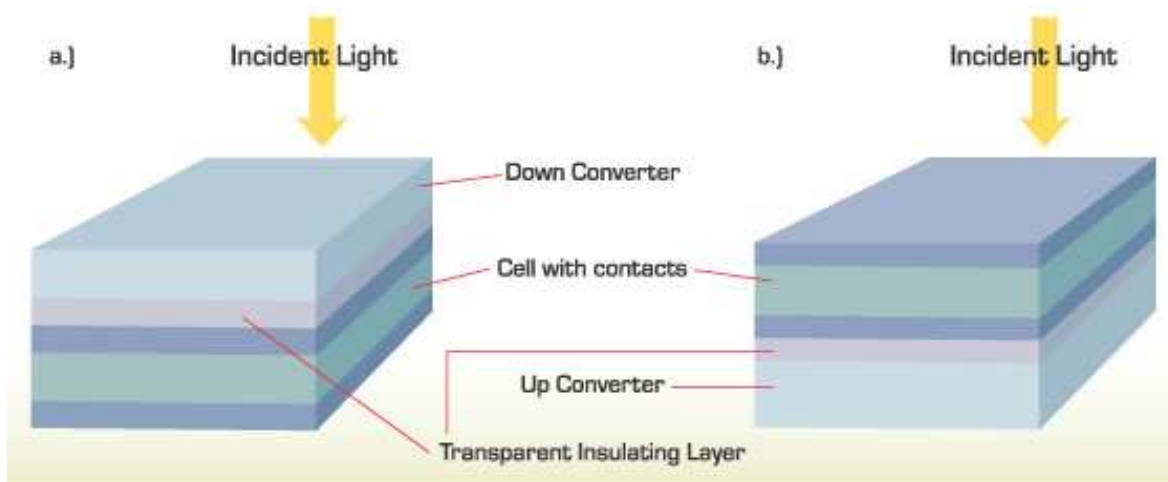
Materiály pro druhou generaci fotovoltaických článků, označovaných též jako články z tenkých vrstev (Thin-film cell), byly vyvinuty hlavně na základě požadavků na omezení výrobních nákladů fotovoltaických panelů. Alternativní výrobní techniky, např. vakuové napařování, elektrolytické pokovování či ultrazvukové nastřikování, jsou výhodou, jelikož významně omezují použití vysokoteplotních procesů. Tato výrobní technologie umožňuje snížit výrobní náklady pod 0,5 USD/W, jelikož defekty vznikající při tomto způsobu výroby nemají tak podstatný vliv na účinnost produkovaných článků. Mezi nejvýznamnější zástupce druhé generace patří články z CdTe (Cadmium-Telluride), CIGS (Copper indium gallium selenide), amorfního a tzv. mikromorfního křemíku. Tyto materiály jsou aplikovány v tenké vrstvě na základní materiál, např. keramiku či sklo, což vede k redukci potřebného množství a tedy i ceny. Tyto technologie slibují dobré účinnosti při podstatně nižších výrobních nákladech. Komerční výroba započala zhruba v roce 2007, nabízí jí např. společnost First Solar, Inc. (CdTe), Würth Solar (CIGS-CIS), Nanosolar, Inc. (CIGS), Honda Soltec Co., Ltd. (CIGS) aj. Podíl druhé generace na světovém trhu činil za rok 2007 4,7 % pro CdTe, 5,2 % pro články s tenkovrstvým křemíkem a 0,5 % pro články CIGS.



Obr. 3 – Panel HEM125PA, Honda Soltec Co., Ltd., technologie CIGS. Doporučená cena 125W článku o rozměrech 1,417 x 791 x 37 mm a váze 14,3 kg činí 496 USD.

3.3 Třetí generace

Cílem vývoje třetí generace fotovoltaických článků je zlepšení účinnosti oproti článkům druhé generace při zachování nízkých výrobních nákladů. Záměrem probíhajících výzkumů je dosažení účinnosti 30 - 60 % za použití relativně levných materiálů a výrobních technologií. Předpokládá se překročení teoretického limitu účinnosti pro materiály s jedním prahovým napětím, vypočítaným v r. 1961 (Shockley-Queisser limit) a stanoveným na 31 % při standardním osvětlení a na 40,8 % za použití koncentrátoru. Mezi možné přístupy, jak dosáhnout takto vysokých účinností, patří použití vícepřechodových fotovoltaických článků, modifikace spektra a koncentrace záření, využití generovaného tepla na článku ke zvýšení napětí (při nesnížení proudu) či počtu nositelů náboje a v neposlední řadě k využití infračervené části spektra k výrobě elektrické energie v noci. Tyto technologie zahrnují křemíkové nanostruktury, Up/Down konverzi, využití termoelektrického a termofotonického jevu, povrchových plasmonů (kvazičástic), články s „horkými“ nositeli náboje aj. [15]



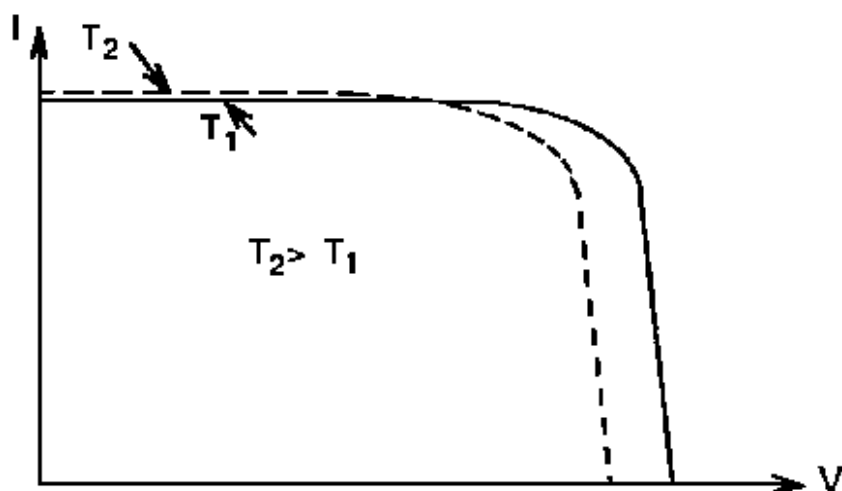
Obr. 4 – Up/Down konverze

a) U „Down“ konverze je luminofor umístěn na povrchu článku s určitým zakázaným pásmem. Vysokoenergetické fotony jsou absorbovány luminoforem a vyzářeny s takovou energií, aby je mohl článek absorbovat. b) Při „Up“ konverzi dochází k absorpci nízkoenergetických fotonů vyzařovaných článkem a k jejich konverzi na fotony s vyšší energií, které jsou následně reemitovány zpět k článku a absorbovány.

4 Teplotní a spektrální charakteristiky fotovoltaických článků

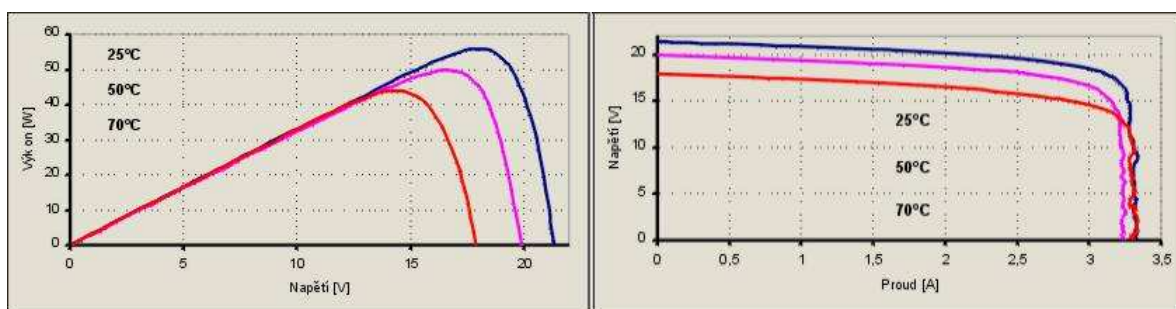
Cílem měření spektrálních a teplotních charakteristik fotovoltaických článků je predikce jejich funkce a účinnosti v závislosti na klimatických podmínkách jejich použití. Znalost těchto charakteristik rovněž dává prostor pro návrh vhodných opatření na zvyšování účinnosti a životnosti fotovoltaických článků. Mezi tato opatření patří například použití vhodného spektrálního filtru. Omezení ultrafialové části spektra vede ke snížení degradace článků a tím ke zvýšení životnosti, omezení infračerveného spektra (nad cca 1200 nm) výrazně omezí zahřívání článků, což vede ke zvýšení účinnosti a rovněž dle některých předpokladů ke zvýšení životnosti omezením tepelné degradace. Dalším opatřením může být konstrukce kombinovaných fotovoltaicko-tepelných článků, kde je teplo z článků odváděno a použito např. pro ohřev teplé užitkové vody, tak jak to známe u běžných solárních kolektorů. [2]

4.1 Teplotní charakteristika



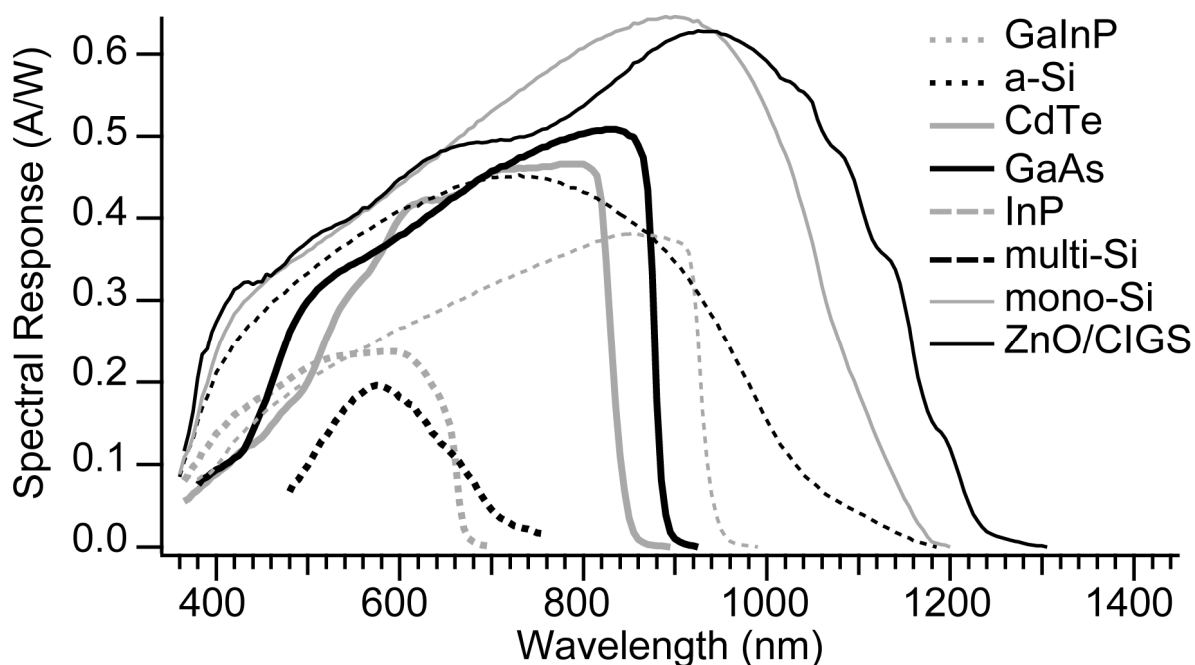
Obr. 5 – Obecná VA charakteristika křemíkového fotovoltaického článku

Jak je z obrázků č. 5 a 6 patrné, se zvyšující se teplotou může sice nepatrně vzrůstat proud nakrátko, ovšem napětí naprázdno a tím pádem i napětí v oblasti optimálního zatížení (pravý horní roh charakteristiky) rapidně klesá, což vede ke snížení výkonu a účinnosti článku. Mezi teplotami 25 °C a 70 °C tento rozdíl může dosahovat 25%. [3]



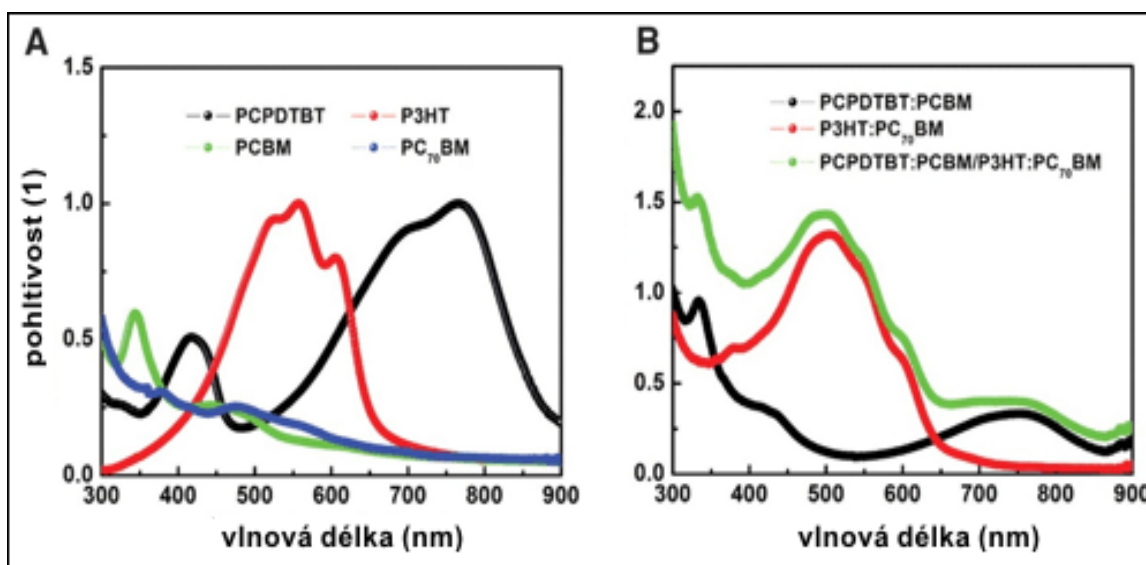
Obr. 6 -Teplotní charakteristika 55W polykrystalického článku (zdroj. ČVUT)

4.2 Spektrální charakteristika



Obr. 7 – Spektrální charakteristiky různých fotovoltaických článků

Na těchto charakteristikách (Obr. č. 7) vidíme rozdílné využití spektra různými druhy fotovoltaických článků. Je tedy patrné, že nyní již zastaralé články, např. s amorfním křemíkem (a-Si), pracují ve velmi úzkém pásmu, kdežto modernější články, např. monokrystalické (mono-Si), využívají i značnou část infračervené oblasti. Je tedy nutné volit vždy vhodný spektrální filtr pro konkrétní typ fotovoltaického článku. Zajímavé spektrální charakteristiky mají články z organických polymerů, viz. Obr. 8. Pro tyto články je typická tzv. tandemová struktura, kdy různé vrstvy pohlcují různou část spektra. [1]



Obr. 8 - Spektrální charakteristiky článků z organických polymerů

Typickou vlastností těchto článků je nízká cena, ovšem i doposud nízká účinnost kolem 6,5 %. Výhodou je odolnost, možnost jejich sbalení a opětovného rozložení, což je využíváno hlavně pro vojenské aplikace.

Z uvedených poznatků je jasné, že vliv teploty a spektra na provoz fotovoltaických článků je zásadní. Je tedy nutné tomuto tématu věnovat pozornost a volbou vhodného technického řešení optimalizovat jejich provoz. K těmto opatřením patří např. volba vhodného spektrálního filtru či kombinovaná konstrukce fotovoltaicko-tepelných článků.

5 Fotovoltaické systémy elektrotechnické fakulty

Fotovoltaické systémy instalované na elektrotechnické fakultě může rozdělit do dvou základních oblastí.

5.1 Fotovoltaický systém 20 kWp

V roce 2004 byl zahájen provoz FV systému. Systém tvoří 192 panelů Isofoton I110 dodaných společností Solartec, celkový instalovaný výkon činí 20 352 Wp. Panely jsou uspořádány do 8 samostatných polí po 24 panelech. Články v polích jsou zapojeny do 3 větví po 8 panelech (sério-paralelní zapojení), každé pole je připojeno k vlastnímu střídači SunProfi SP2500-450 společnosti Sun Power. Vyrobená energie je dodávána do sítě nízkého napětí přes rozvaděč RO 02.5. Panely jsou instalovány na jižní straně střechy pod úhlem 45° na pozinkované ocelové konstrukci, ukotvené do střechy. Ukládání naměřených hodnot se provádí pomocí programu PV Enlargement na počítači v místnosti EK 703, zpracovávají se pouze data z pole č. 8.



Obr. 9 - Fotovoltaický systém na budově Elektrotechnické fakulty, 20 kWp

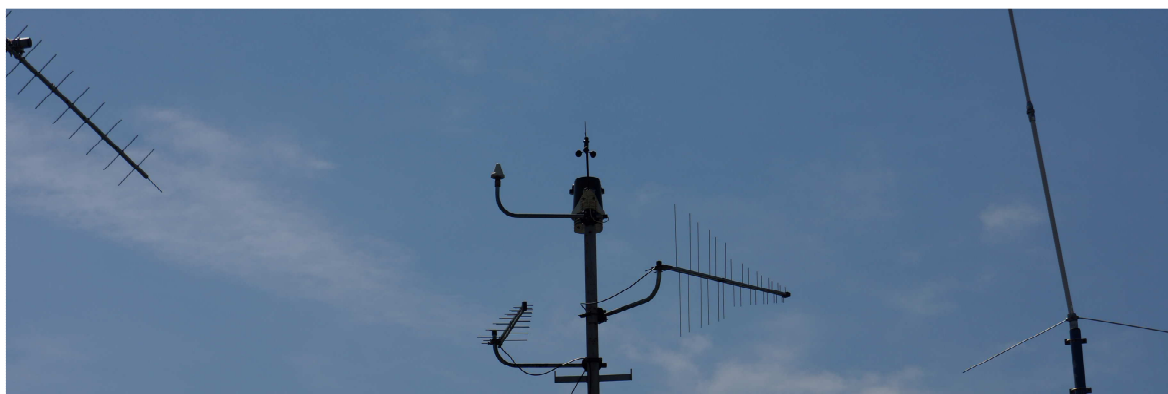
5.2 Experimentální fotovoltaické systémy

Na střeše elektrotechnické fakulty se nachází „Minipark obnovitelných zdrojů“. Ten krom fotovoltaických systémů obsahuje rovněž malou 500W větrnou elektrárnu AeroCraft a několik typů solárních tepelných kolektorů zapojených do tepelného čerpadla.



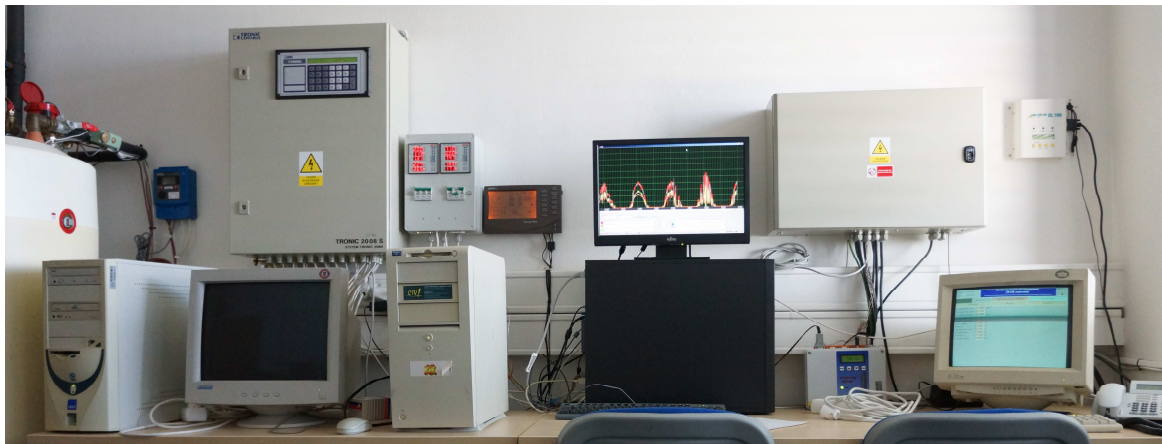
Obr. 10 - Minipark obnovitelných zdrojů

Minipark vhodně doplňuje meteorologická stanice Davis Vantage Pro.



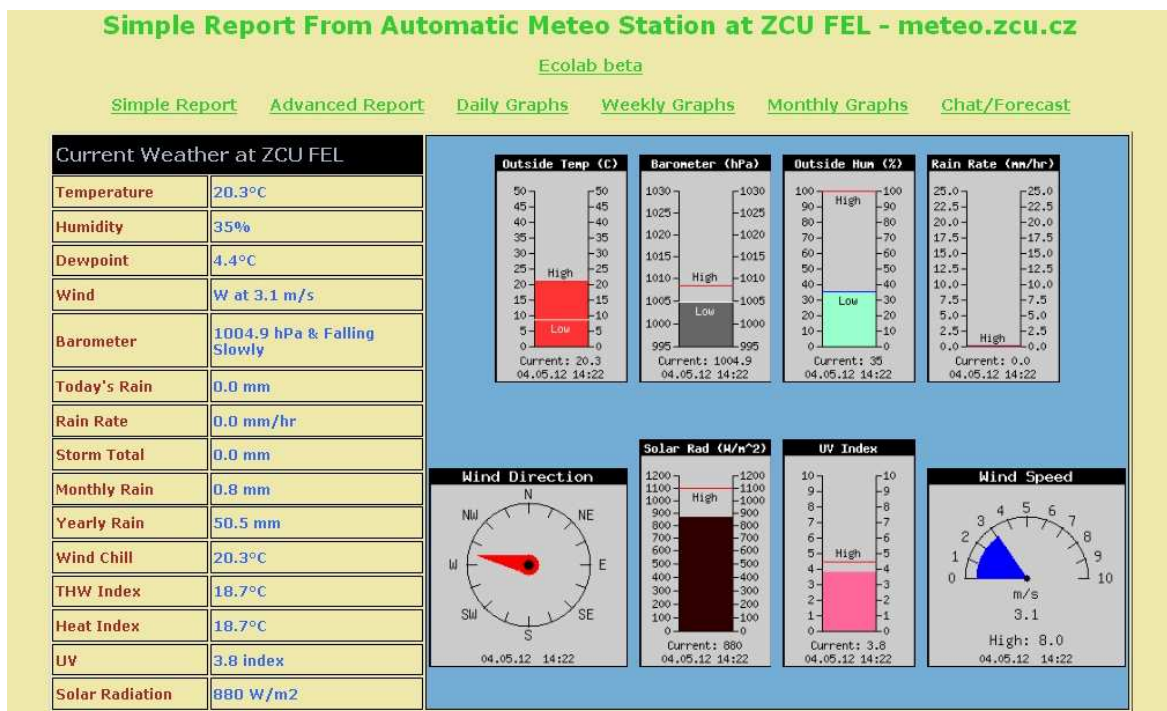
Obr. 11 - Meteostanice Davis Vantage Pro

Pro účely záznamu dat jak z obnovitelných zdrojů elektrické energie, tak z meteorologické stanice jsem vytvořil měřící systém postavený na platformě průmyslového počítače.



Obr. 12 - Měřící systém

Z důvodu prezentace Oddělení technické ekologie a širšího zájmu o meteorologická data jsem rovněž vytvořil webový portál „meteo.zcu.cz“, který pracuje na vlastním serveru. Data jsou generována na měřícím systému a posílána s minimálním zpožděním na server webového portálu.



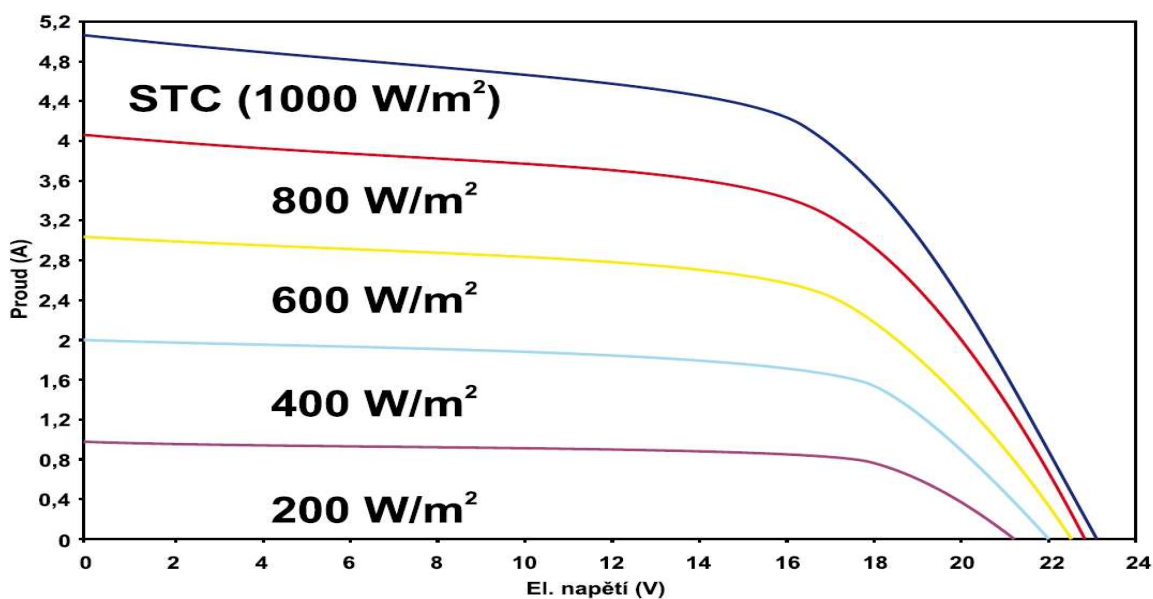
Obr. 13 - Webový portál meteo.zcu.cz

5.2.1 Tegola

FV systém „Tegola“ se sestává ze dvou panelů Tegosolar PVL – 68. Celkový instalovaný výkon činí 136 W. Jedná se o panely druhé generace. Každý panel se skládá z 11 ks 3-přechodových amorfních solárních článků velikosti 356x239 mm zapojených do série. Rozměr panelu je 2849x394 mm, hmotnost 3,9 kg. Panely jsou zapojeny přes střídač Exendis Gridfit 250 a multimetr DMK 62 do sítě. Úhel instalace 38 °.



Obr. 14 - Fotovoltaický šindel Tegola



Obr. 15 - V/A charakteristiky panelu Tegosolar PVL – 68, průzračnost oblohy AM 1,5 a teplota panelu 25°C.

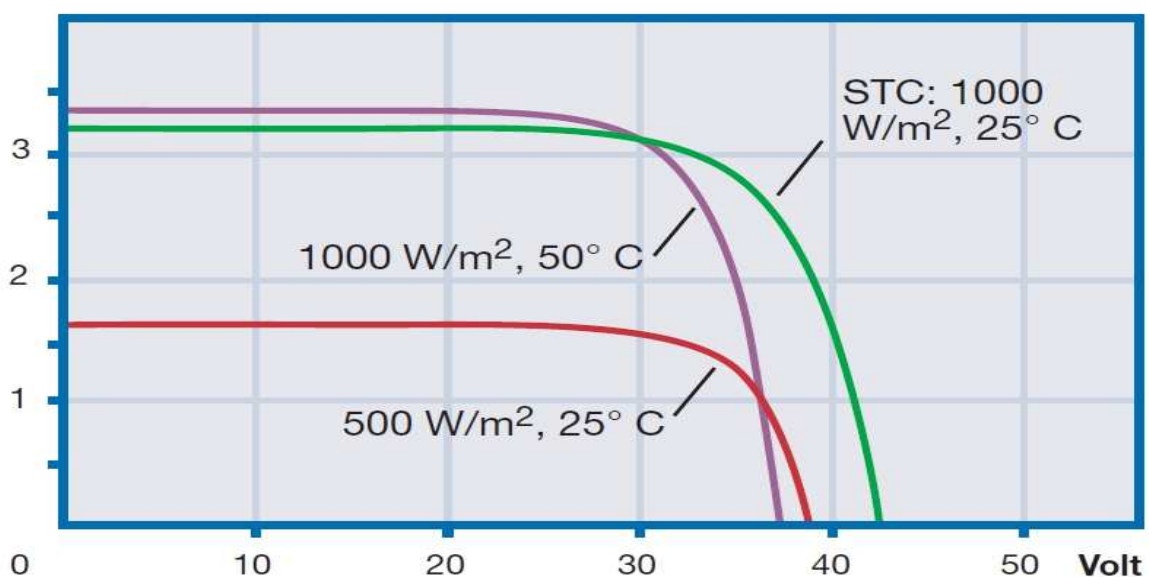
5.2.2 Pozicioner

FV systém „pozicioner“ se skládá ze dvou polykrystalických panelů SCHOTT ASE-100-GT-FT/K o celkovém instalovaném výkonu 200 W. Panely jsou umístěny na dvouosém sledovači Sunflex-2 a přes střídač Gridfit Exendis 250 a multimetr DMK 62 zapojeny do sítě.



Obr. 16 - Dvouosý sledovač s dvěma polykrystalickými panely. P=200 Wp.

Ampere



Obr. 17 - V/A charakteristiky panelu SCHOTT ASE-100-GT-FT/K

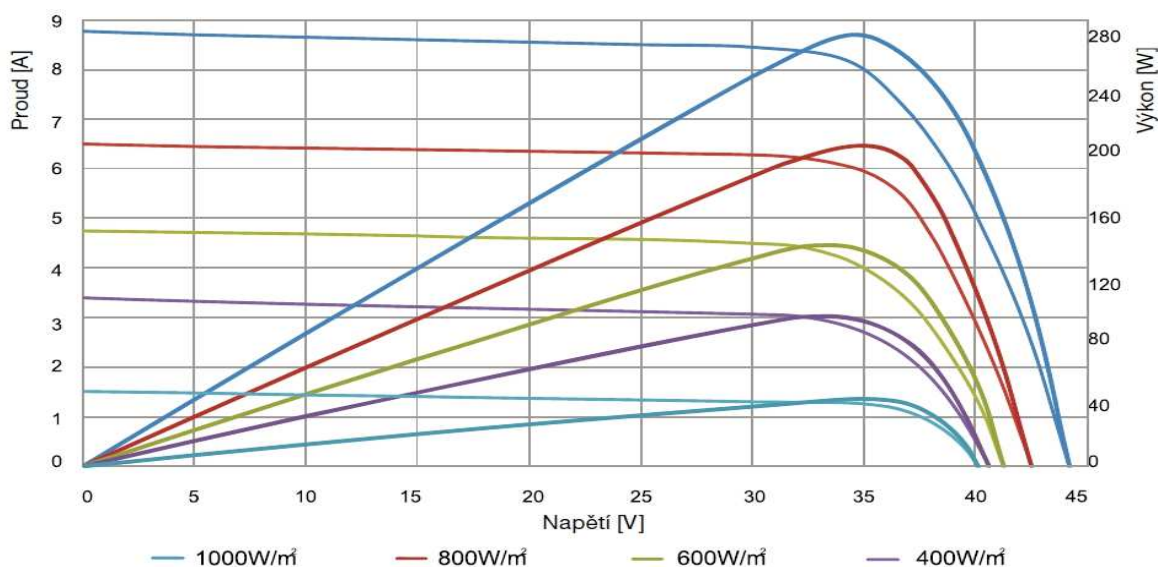
5.2.3 Systém se třemi panely

Systém je tvořen třemi panely – polykrystalickým MY 280-P, panelem z tenkých filmů MY 145-CIGS a monokrystalickým MY 180-M. Úhel instalace 45 °.



Obr. 18 - Systém se třemi panely. Zleva: kombinovaný FV-tepelný panel (není součástí systému), MY 145-CIGS, MY 180-M a MY 280-P.

MY 280-P – panel složený ze 72 ks polykrystalických křemíkových buněk o celkovém výkonu 280 W. Rozměry panelu 1956x992 mm.

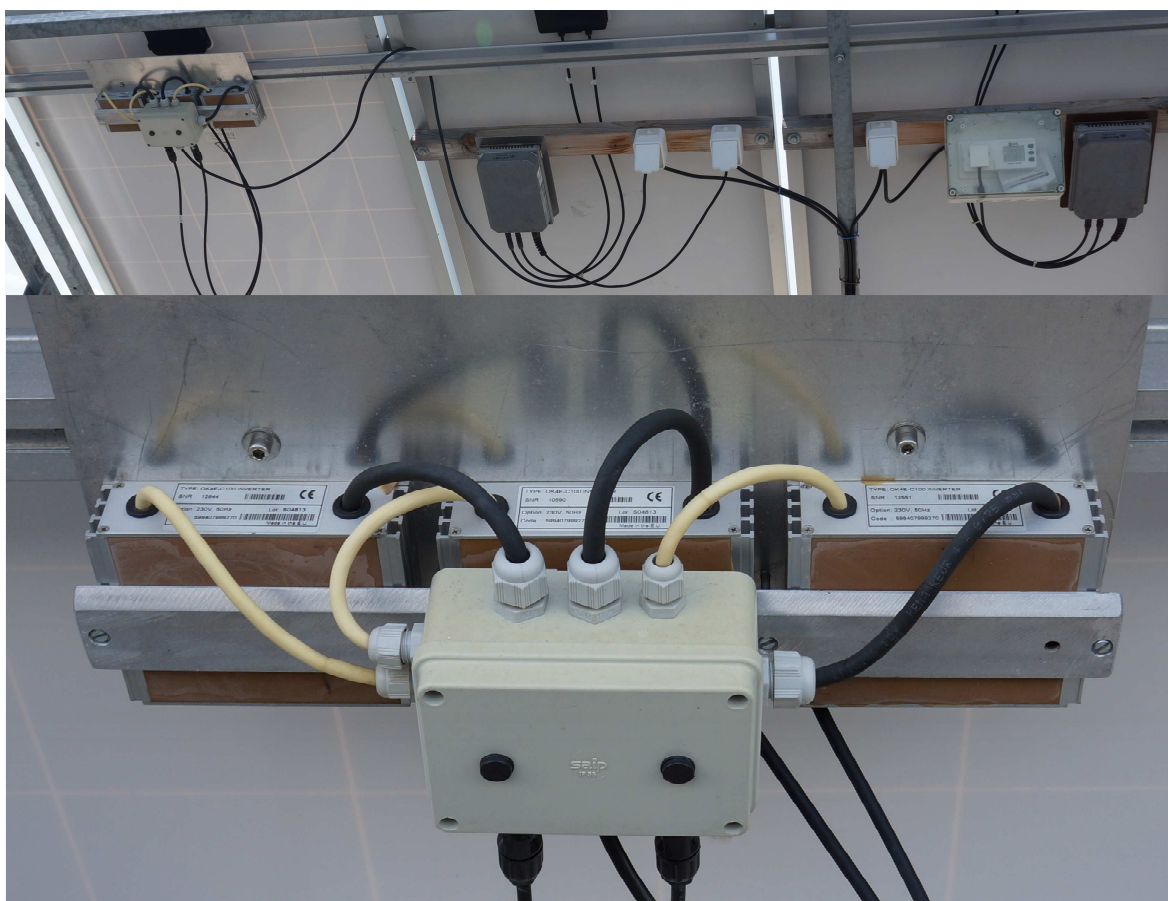


Obr. 19 - Výkonové a VA charakteristiky panelu MY 280-P.

MY 145-CIGS – panel obsahuje 72 ks tenkovrstvých článků CIGS (Copper Indium Gallium DiSelenide) o celkovém výkonu 145 W. Jedná se o solární články druhé generace. Rozměry panelu 1936x890 mm.

MY 180-M – panel je tvořen 72 ks monokrystalických článků o celkovém výkonu 180 W. Rozměry panelu 1580x808 mm.

Panely MY 180-M a MY 145-CIGS jsou zapojeny každý přes samostatný střídač Exendis Gridfit 250 a multimetr DMK 32 do sítě. Panel MY 280-P je zapojen přes tři paralelně zapojené střídače NKF Electronics OK4E-C100 a multimetr DMK 32. Každý panel je připojen přes multimetr samostatně, tj. každý na jedné fázi (stejně jako v případě Tegoly a Pozicionéru přes multimetr DMK 62), tudíž měření probíhá odděleně a jsou k dispozici data pro každý panel zvlášť.



Obr. 20 - Připojení panelů k měničům. Zleva: MY 280-P zapojený přes tři měniče NKF Electronics OK4E-C100, MY 180-M a MY 145-CIGS zapojeny přes měniče Exendis Gridfit 250. Dole detail tří měničů NKF Electronics OK4E-C100.

5.2.4 Dva úhly

System vznikl za účelem výzkumu vlivu úhlu instalace na funkci FV systémů a to úpravou vertikálního sledovacího zařízení „Tracker“. Sestává se ze dvou monokrystalických panelů Isofoton I110 (stejných jako u velkého systému 20 kWp). Každý panel je zapojen samostatně přes vlastní střídač NKF Electronics OK4E-C100 a multimetr DMK 32 do sítě. Měří se tedy samostatně. Teoretický vypočítaný optimální úhel instalace činil (výpočet z naměřených dat 20 kWp systému pro rok 2008 a místní podmínky) 27°. Z toho to důvodu jsem se rozhodl dlouhodobě porovnat dva totožné panely jako u 20 kWp systému pod úhly 27° (vypočítaný) a 34° (obecně uznávaný optimální úhel instalace pro maximální roční množství vyrobené el. energie).

Isofoton I110 - panel se skládá ze 72 ks monokrystalických článků o celkovém výkonu 110 W. Rozměry 1310x654 mm. Jedná se o starší typ panelů vyráběných do roku 2005.



Obr. 21 - dva panely Isofoton I110 nainstalovány pod úhly 27° a 34°

6 Vlastní výzkum

Vlastní výzkum vychází a navazuje na data z 20 kWp systému za rok 2008. Věnuje se nejen vlivu úhlu instalace na funkci FV systémů, ale rovněž vlivu vnějších podmínek, převážně klimatických. Vliv těchto podmínek byl zkoumán na různé typy panelů (monokrystalické, polykrystalické, amorfni, CIGS) a na různý způsob jejich instalace (pevná, na sledovači). Vhodným doplněním je pak porovnání funkce FV systému a malé větrné elektrárny.

6.1 20 kWp FV systém – rok 2008

6.1.1 Naměřené hodnoty FV systému

Elektrická data jsou měřena přímo ze článků, ostatní data jsou měřena snímači umístěnými v blízkosti fotovoltaických článků. Rozhodl jsem se zpracovat z naměřených dat „průměrné“ hodnoty, přestože nejsou exaktně definované, jelikož jsem předpokládal, že budou nejvíce odpovídat realitě. K dispozici jsou ještě hodnoty maximální a minimální, měření je prováděno vždy v 10 minutových intervalech a to od 03:50 do 23:00 včetně. Je tedy zaznamenáváno 116 měření za den, dochází ovšem k poměrně častým výpadkům. Naměřená data jsou ukládána do textových souborů, vždy jeden soubor za den. Nejkomplexnější data jsou za rok 2008, kdy jsou k dispozici kompletní měření pro 328 dní, proto jsem se rozhodl zpracovat právě data za rok 2008, a to i pro to, že data za tento rok neobsahují tak velké množství nereálných hodnot jako za roky předchozí (např. teploty článků - 62,5 °C apod.). Textové soubory s daty jsem nejprve spojil do jednoho souboru, poté jsem na tento soubor aplikoval převodník (parser) postavený na software Gawk. Jinak by nebylo možné data importovat do programu Excel pro další zpracování. Takto jsem zpracoval a mám k dispozici bezmála 40 000 měření za rok 2008. V Excelu jsem poté odstranil data, kdy pro daný den nebyla měření kompletní, a zůstala „čistá“ data pro další zpracování.

Z těchto dat jsem poté za pomoci kontingenčních tabulek vytvořil denní a měsíční průměry pro další zpracování a výpočty.

Tab. 1 – ukázka importovaných dat

Datum měření	Čas měření	Horiz. osvit [W/m ²]	t ve stínu [°C]	Osvit pole [W/m ²]	t ref. [°C]	t pole [°C]	U pole [V]	I pole [A]	P pole [W]	P do sítě [W]
1.1.2008	3:50:00	0,48	1,31	-0,33	-0,03	-0,24	0,48	0,01	0,01	-3,75
1.1.2008	4:00:00	1,04	1,80	-0,33	0,26	0,03	0,49	0,01	0,01	-3,75
1.1.2008	4:10:00	0,68	2,08	-0,33	0,19	0,14	0,49	0,01	0,01	-3,77
1.1.2008	4:20:00	0,32	2,08	-0,33	0,27	0,24	0,49	0,01	0,01	-3,77
1.1.2008	4:30:00	0,28	2,05	-0,34	0,26	0,24	0,49	0,01	0,01	-3,76
1.1.2008	4:40:00	-0,01	1,85	-0,33	0,15	0,10	0,48	0,01	0,01	-3,76
1.1.2008	4:50:00	-0,39	1,44	-0,32	-0,12	-0,19	0,47	0,01	0,01	-3,76

Z ukázky dat je patrné, že některé hodnoty neodpovídají příliš realitě (např. záporné hodnoty horizontálního osvitu či osvitu pole), je to způsobeno pravděpodobně chybou měření (senzorů).

Jak již bylo řečeno, z importovaných dat byly vytvořeny za pomoci kontingenčních tabulek denní a měsíční průměry pro další zpracování a výpočty. Z hodnot jsem zpracoval nejrůznější charakteristiky a vypočítal např. účinnost měniče, optimální úhel instalace panelů apod.

Tab 2. – ukázka denních průměrných hodnot seřazených dle prům. výkonu pole

Měsíc	Datum	Horiz. osvit [W/m ²]	Osvit pole [W/m ²]	P do sítě [W]	P panelů [W]	t pole [°C]	t ref. [°C]	t ve stínu [°C]	Účinnost měniče [%]
Prosinec	12.12.2008	14,916	1,044	-3,493	1,498	1,414	1,116	1,823	-233,197
Prosinec	16.12.2008	9,356	6,067	-3,523	2,982	5,490	5,264	5,804	-118,172
Prosinec	13.12.2008	14,697	4,589	-3,758	3,009	2,725	2,430	3,062	-124,896
Prosinec	17.12.2008	8,567	5,982	-3,467	3,073	4,930	4,633	5,260	-112,825
Prosinec	27.12.2008	11,010	6,085	-4,089	3,449	-1,462	-1,612	-0,956	-118,537
Říjen	1.10.2008	37,391	30,984	-0,628	3,688	14,461	14,168	14,547	-17,022
Září	30.9.2008	53,960	51,530	-0,398	3,888	13,098	12,770	12,640	-10,245
Říjen	2.10.2008	72,819	70,115	-0,874	3,992	13,009	12,796	12,589	-21,904
Září	28.9.2008	183,907	260,676	0,277	4,046	19,396	19,338	11,680	6,839
Září	29.9.2008	157,339	199,292	0,248	4,091	16,961	16,253	11,993	6,060

6.1.2 Výpočet optimálního úhlu instalace FV systému a naměřené a vypočtené charakteristiky

Z měření máme k dispozici hodnoty jak horizontálního osvit, tak i osvit pole, což umožňuje výpočet osvit při optimálním úhlu a zároveň samozřejmě vypočítat tento úhel. Z těchto hodnot je poté možno stanovit optimální instalační úhel (úhel inklinace) celého FV systému.

Soustava rovnic popisující osvit:

$$G_h = G \cdot \cos \alpha$$

$$G_i = G \cdot \cos \beta$$

$$\beta = \frac{\pi}{4} - \alpha$$

kde G_h =horiz. osvit, G_i =osvit pole, G =celkový osvit, α =úhel odklonu svitu od normály, β =úhel odklonu svitu od 45° (úhlu instalace FV systému)

Výpočet jsem řešil numericky, ovšem možná je i matematická aproximace [17]:

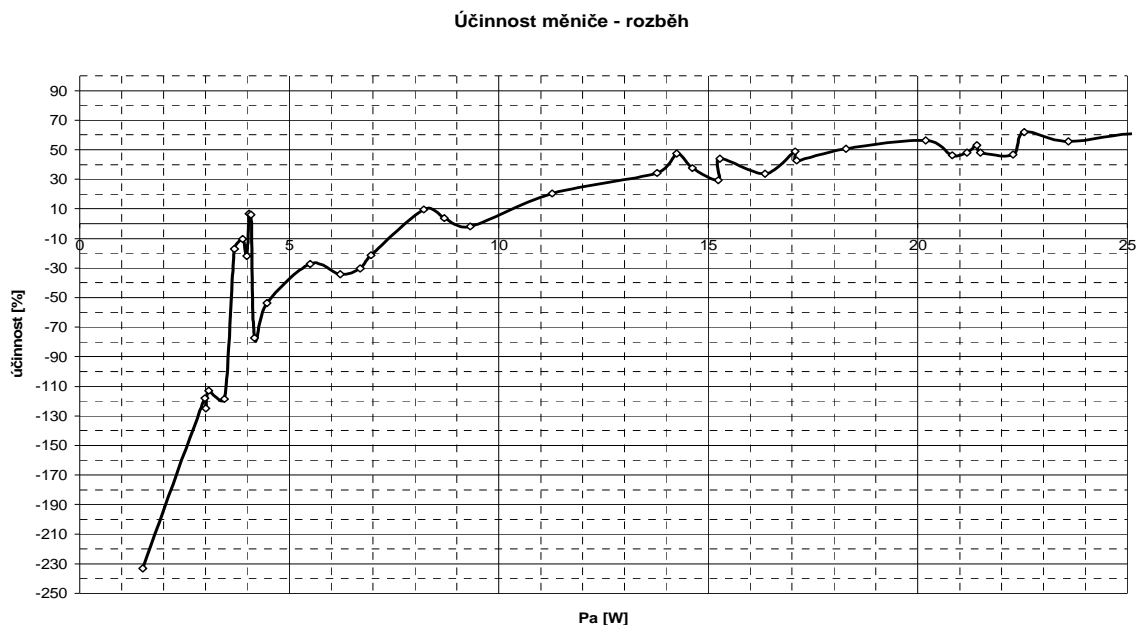
$$G = \pm \frac{\sqrt{\frac{x^2 - 2\sqrt{2}xy + 2y^2}{x^2 - \sqrt{2}xy + y^2}} (\sqrt{2}x^2 - 2xy + \sqrt{2}y^2)}{x - \sqrt{2}y}$$
$$\alpha = \pm \arccos \left(\frac{x\sqrt{x^2 - 2\sqrt{2}xy + 2y^2}}{(-x + \sqrt{2}y)\sqrt{2x^2 - 2\sqrt{2}xy + 2y^2}} \right)$$

kde ve vzorcích x nahrazuje G_h a y nahrazuje G_i (pro přehlednost).

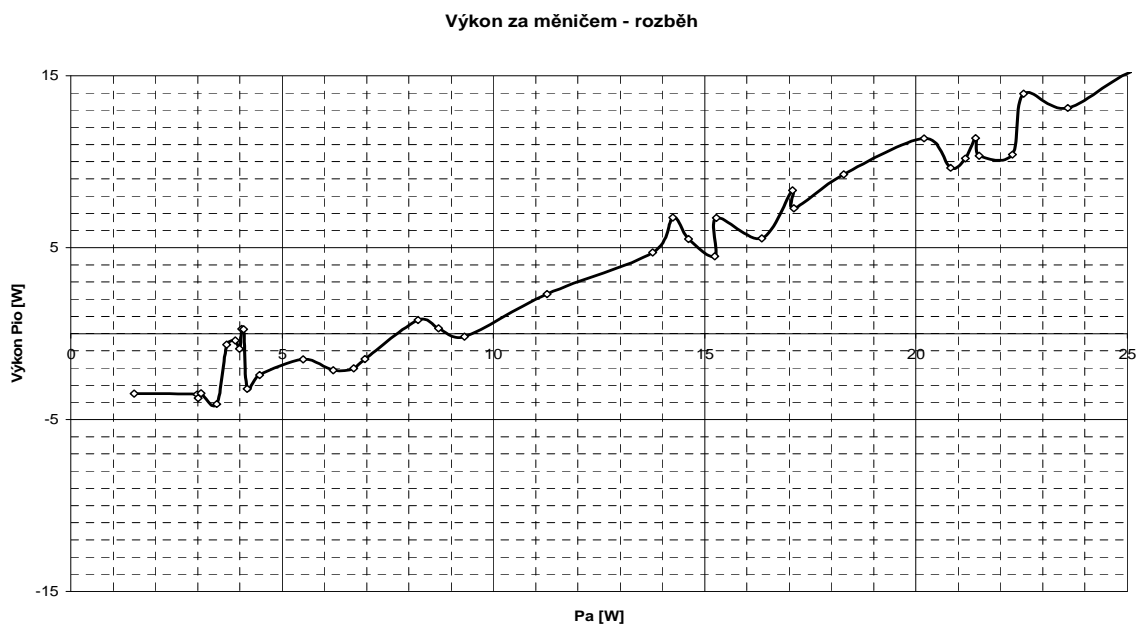
Celkový osvit a úhel osvit jsem vždy vypočítal pro určitý měsíc (měsíční průměr), z něho pak vypočítaný optimální úhel instalace činí 27,12°. Je to hodnota nižší oproti teoretickým 34° [14], ovšem dobře charakterizuje podnebí v Plzni (zvýšená oblačnost a prašnost => vyšší podíl difúzního záření oproti přímému).

6.1.3 Závěry z naměřených a vypočtených hodnot a charakteristik

Měnič se při rozběhu (Graf 1 a 2) chová poněkud nepředvídatelně, což může mít při připojování a odpojování měniče k síti negativní vliv na síť. Grafy v plné velikosti – viz. příloha.

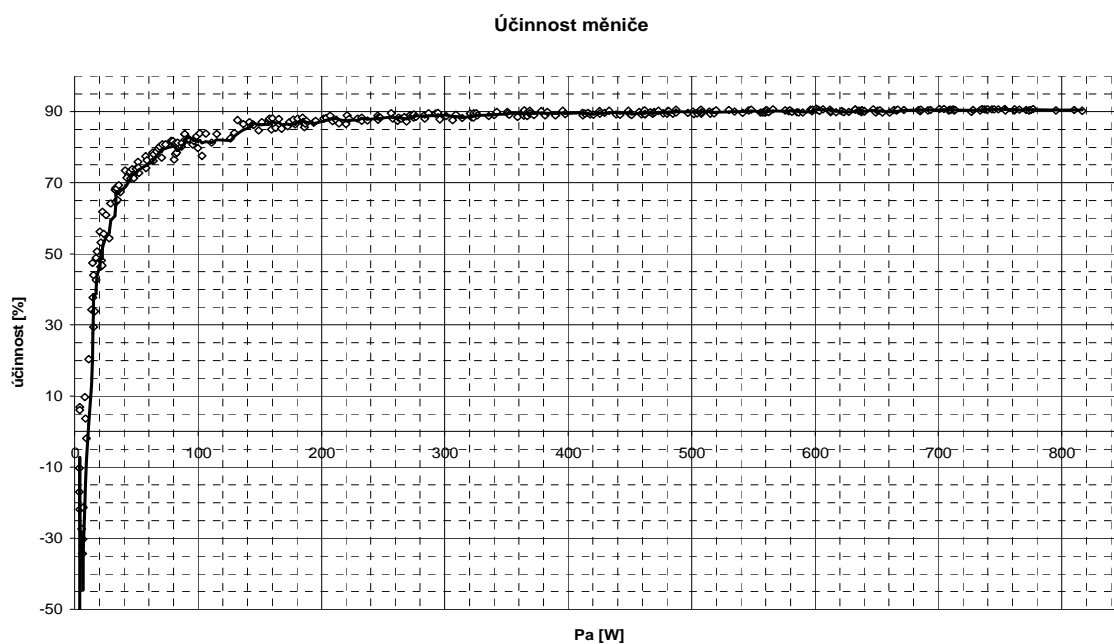


Graf 1 – Účinnost měniče – rozběh



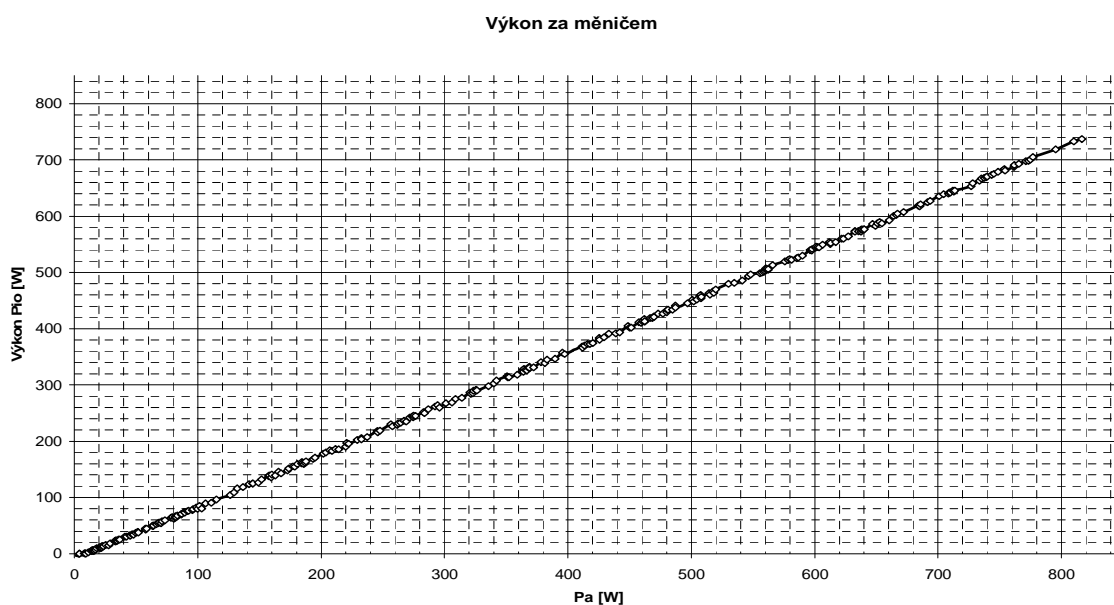
Graf 2 – Výkon za měničem - rozběh

Od výkonu pole zhruba 70 W (Graf 3) dosahuje měnič již účinnosti 80 %, špičková denní účinnost dosahuje bezmála 91 %.



Graf 3 – Účinnost měniče

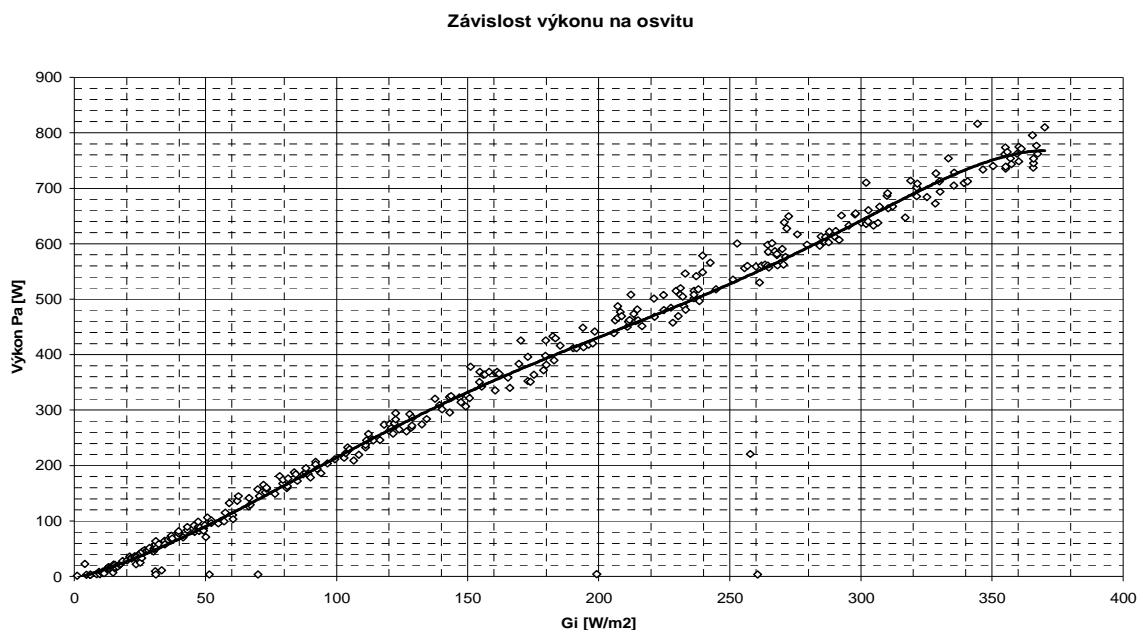
Výkon za měničem (Graf 4) je kromě rozběhu více méně přímo úměrný stejnosměrnému výkonu panelů.



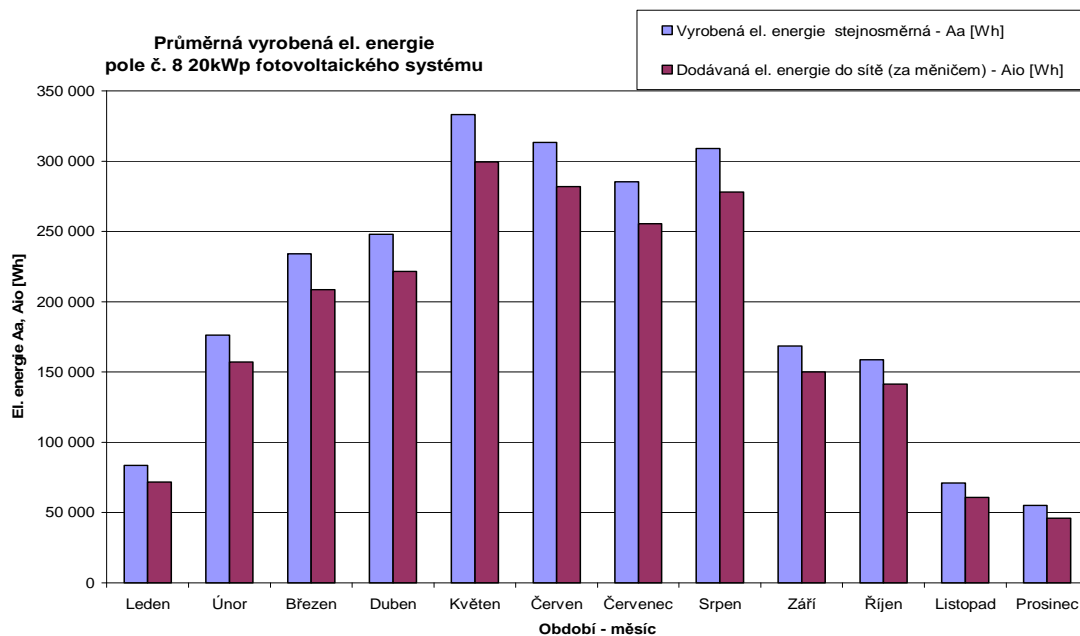
Graf 4 – Výkon za měničem

Stejně tak je téměř lineární závislost stejnosměrného výkonu pole na jeho osvitu (Graf 5), i zde je ale možné pozorovat určité zvlnění, a to hlavně na konci

charakteristiky, kde se jedná pravděpodobně o negativní vliv teploty na účinnost v letních měsících.



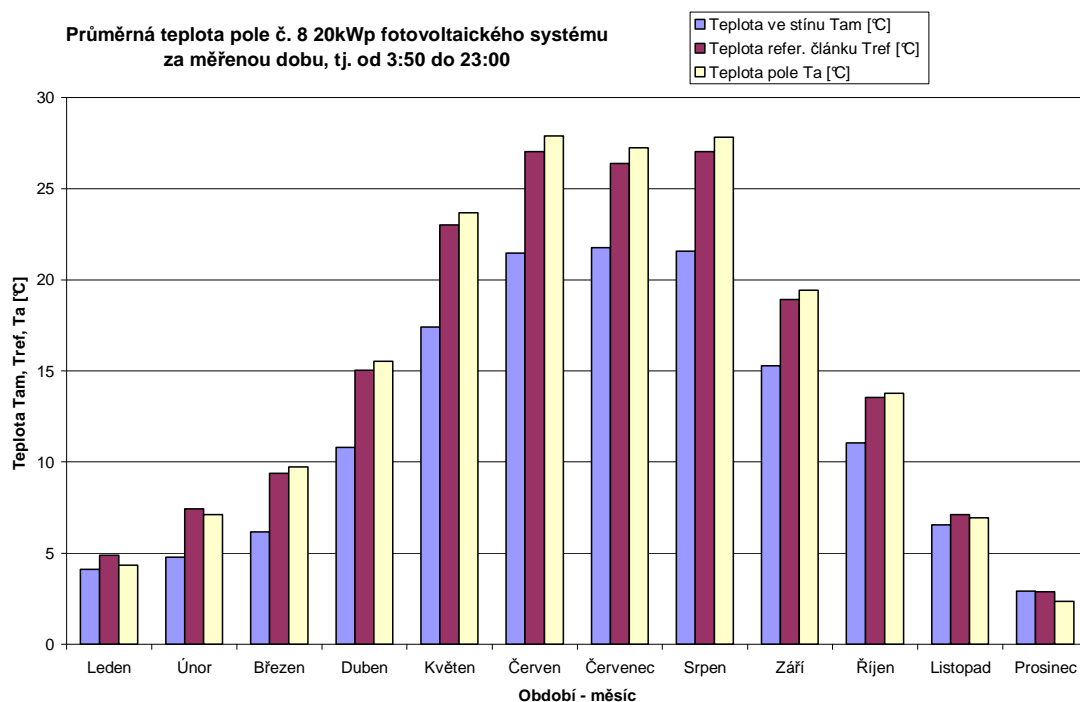
Graf 5 – Závislost výkonu na osvitu



Graf 6 – Průměrná vyrobená el. energie pole č. 8 20kWp FV systému

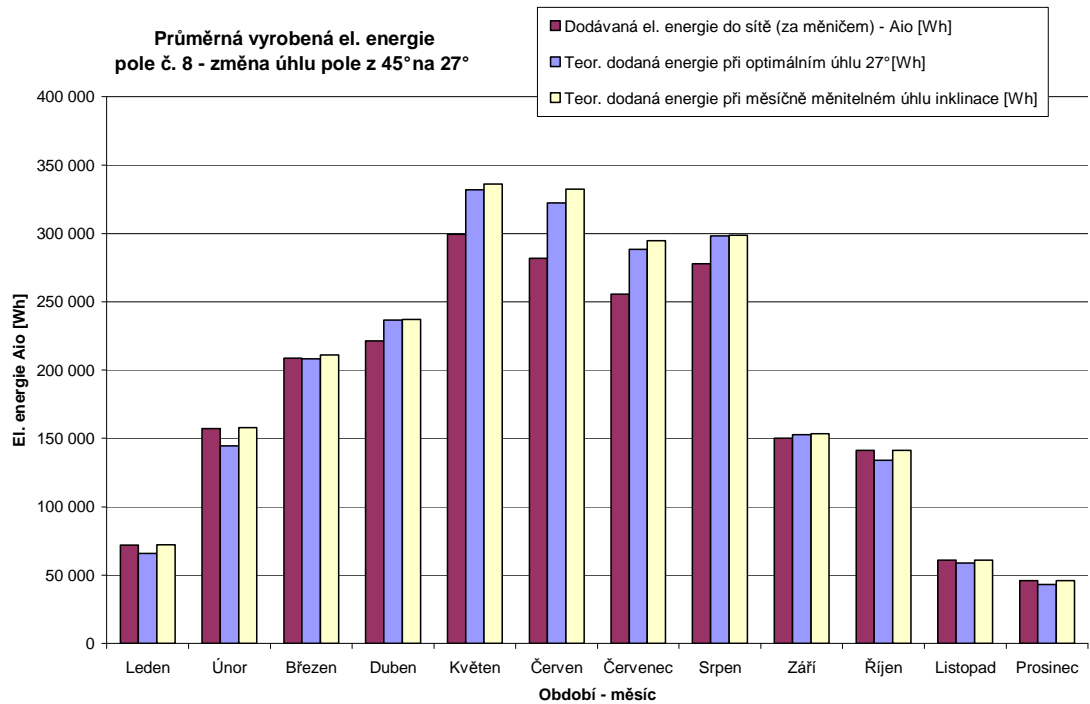
Z pohledu vyrobené energie (Graf 6), bylo největší množství naměřeno v květnu, jelikož v červnu a červenci se pravděpodobně již projevil zmíněný pokles

účinnosti vlivem oteplení pole. Nejmenší množství vyrobené elektrické energie dle předpokladů připadá na listopad a prosinec. Nejvyšší průměrná měsíční teplota pole za měřené období (Graf 7) dosahuje hodnoty cca 27 °C pro měsíce červen, červenec a srpen.

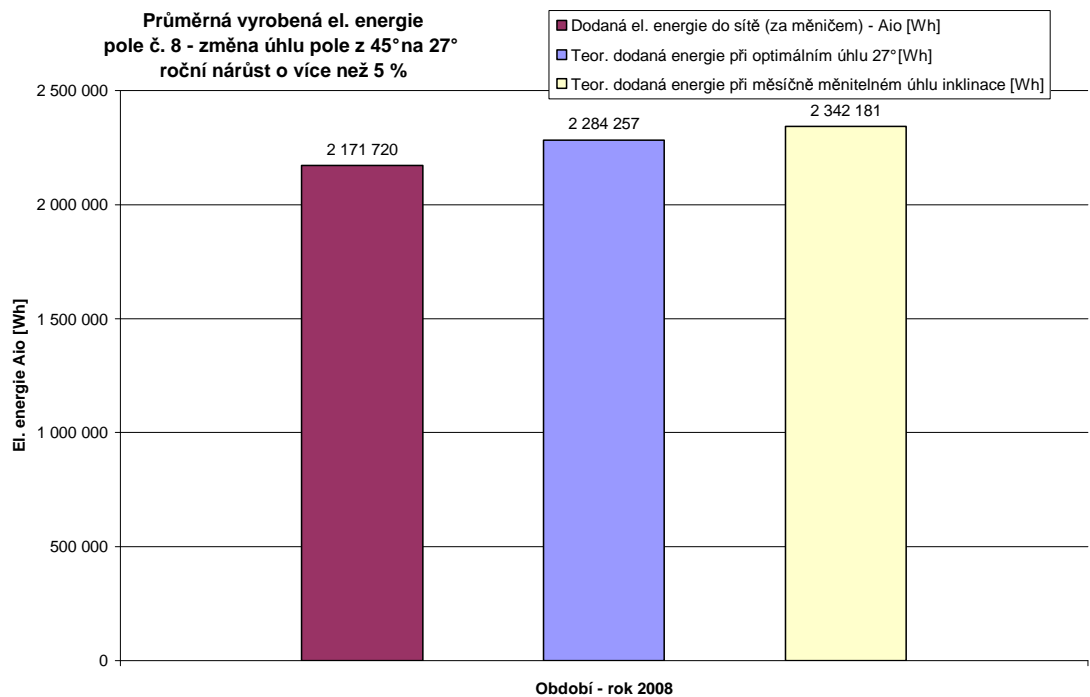


Graf 7 – Průměrná teplota pole č.8 20kWp FV systému

Zajímavé je srovnání měsíčních množství vyrobené energie s hodnotami vypočítanými pro opt. instalovaný úhel článků 27° (Graf 8). Zde je patrné, že zhruba od října do března by byla dodávaná energie nižší, ovšem zvýšení dodávky od dubna do září by celoročně (Graf 9) zvýšilo množství vyrobené energie o více než 5%. Ve výpočtu ovšem nebyl zahrnut vliv zvýšené teploty článků (nižší účinnosti) a snížené samočisticí schopnosti. Pro ilustraci je rovněž dopočítán stav, kdybychom každý měsíc zvolili optimální úhel (Graf 8 a 9). Toto řešení by bylo použitelné u malých elektráren, kdy by bylo možné 12x ročně mechanicky tento úhel změnit.

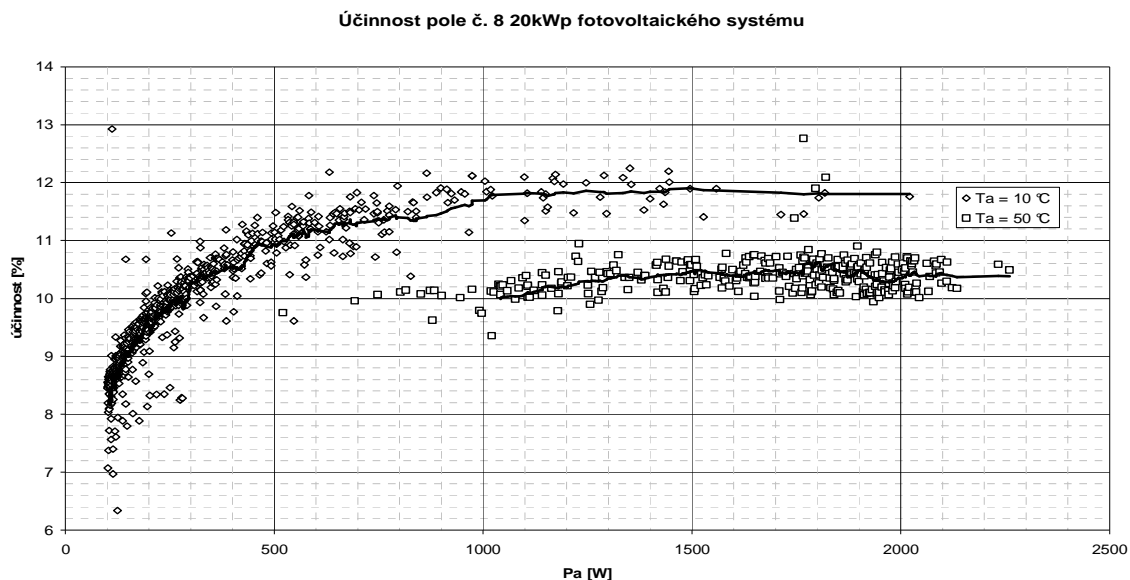


Graf 8 – Průměrná vyrobená el. energie pole č. 8 – změna úhlu z 45° na 27°

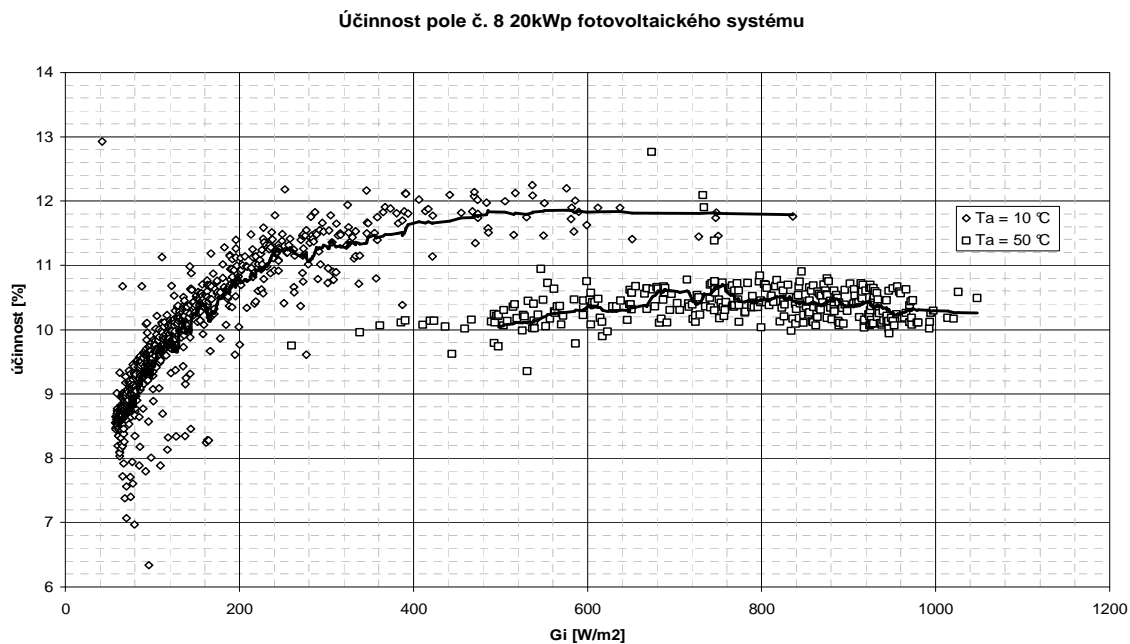


Graf 9 – Průměrná vyrobená el. energie pole č. 8 – změna úhlu pole z 45° na 27°. Roční nárůst o více než 5 %.

Vzhledem k charakteru dat, které jsem měl k dispozici, jsem rovněž provedl porovnání účinnosti pole vzhledem k teplotě článků a to pro teploty 10 a 50 °C (Graf 10 a 11). Rozdíl v účinnosti panelů činí pro tyto teploty více než 1,25 procentního bodu, což odpovídá 15 %.



Graf 10 – Účinnost pole č. 8 20kWp FV systému – závislost na Pa

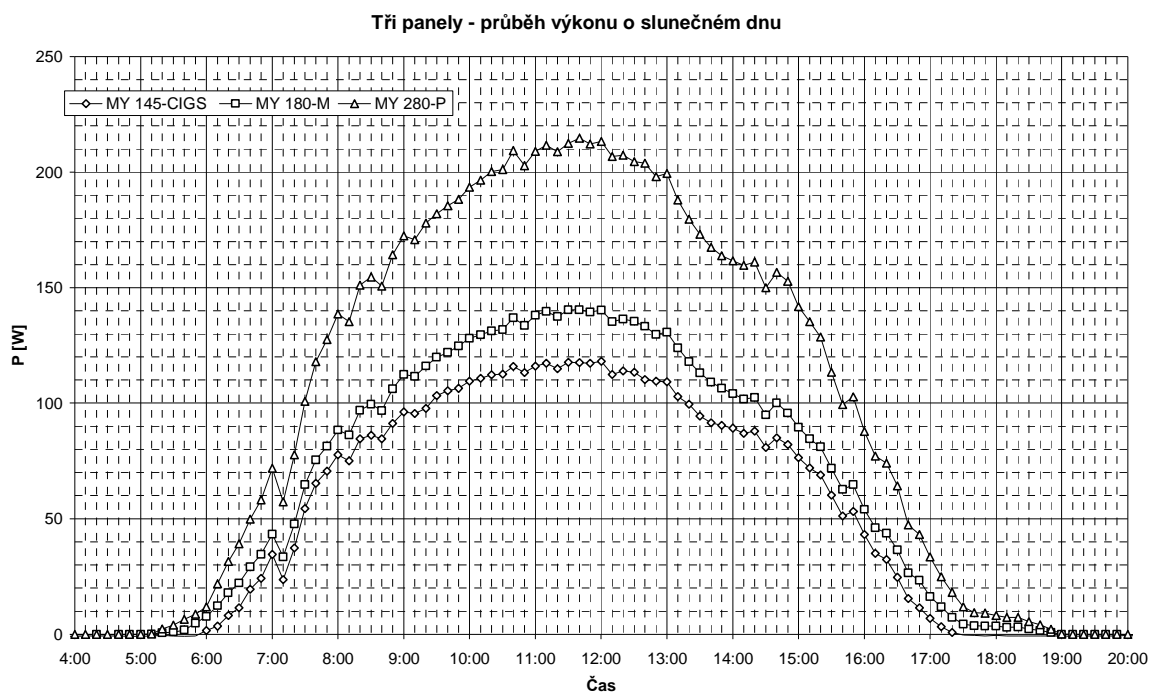


Graf 11 – Účinnost pole č. 8 20kWp FV systému – závislost na Gi

6.2 Experimentální fotovoltaické systémy

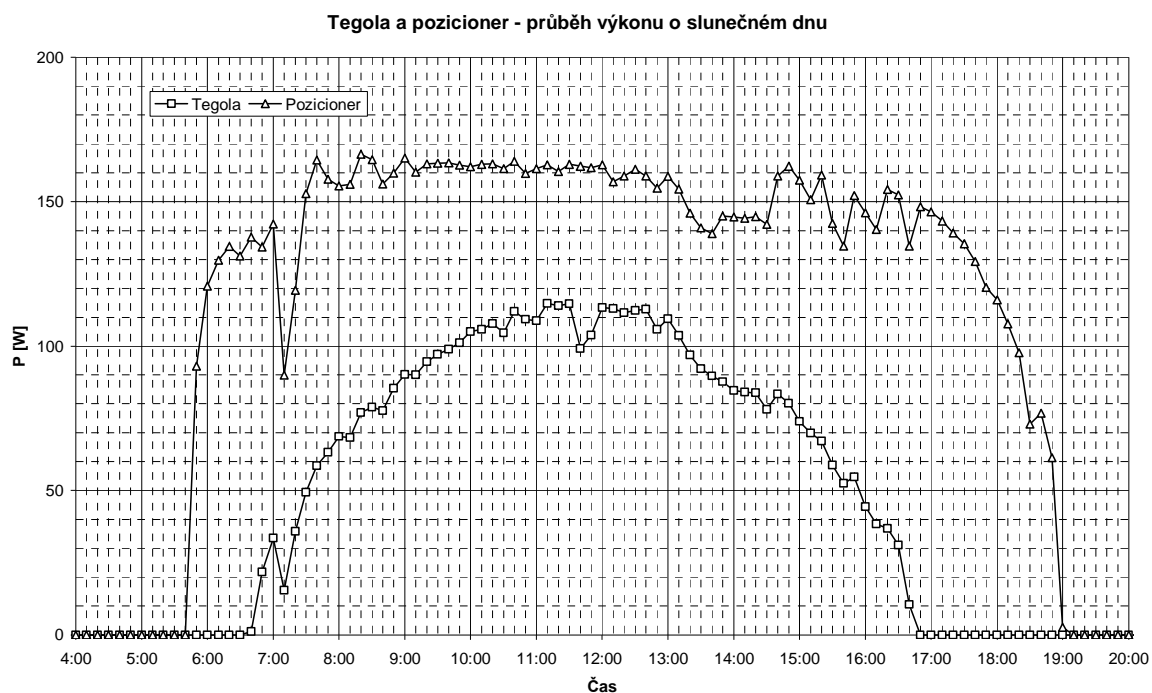
Data z experimentálních systémů jsou měřena pomocí multimetrů DMK 32 a DMK 62. Z multimetrů jsou data posílána přes rozhraní RS-485 do měřicího systému, kde jsou zaznamenávána přibližně každých deset vteřin. Měřenými daty jsou hodnoty napětí, proudu, výkonu, účinníku a harmonických složek napětí a proudu do 17. řádu. Vzhledem k výpadku měření v lednu 2011 způsobeným cizím zásahem do systému jsem se rozhodl analyzovat data od 1.2.2011 do 31.1.2012. Protože jsou data z 20kWp systému zaznamenávána na samostatném zařízení a to v desetiminutových průměrech, rozhodl jsem se z důvodu porovnatelnosti převést do stejného formátu rovněž data z experimentálních systémů a meteorologické stanice (z té se data zaznamenávají nativně v pětiminutových průměrech). Převážně z takto sjednocených dat jsem vyhodnotil následující charakteristiky a závěry.

6.2.1 Tegola, pozicioner a tři panely



Graf 12 - Tři panely - průběh výkonu o slunečném dnu

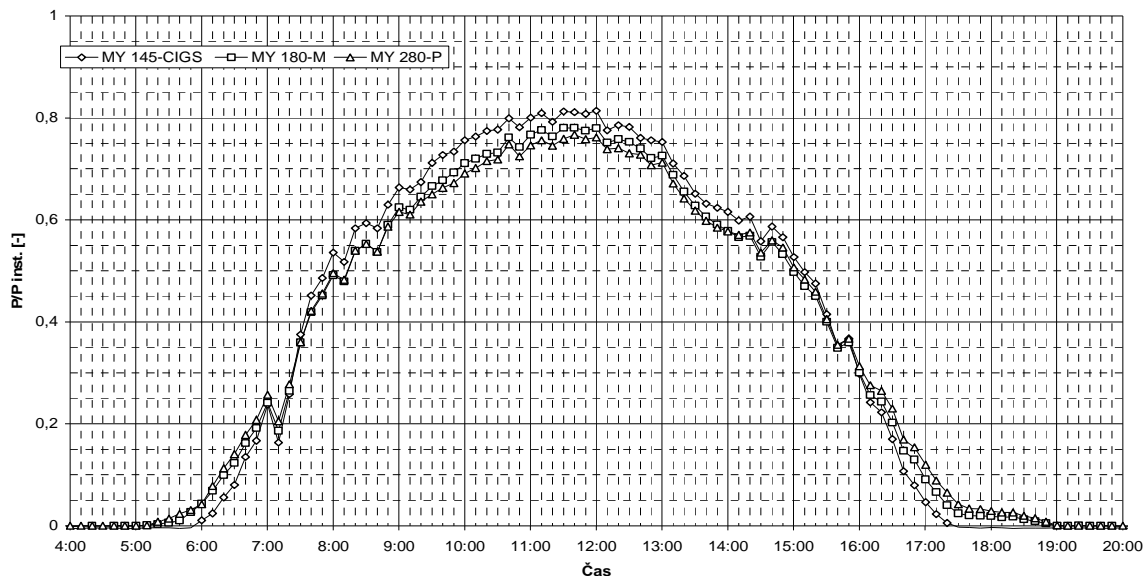
Z grafů 12 a 13 jsou patrné průběhy výkonů během slunečného dne, konkrétně 7.5.2011. Dle předpokladů dosahuje nejvyššího výkonu panel MY 280-P. Zvlnění průběhu je pro všechny tři panely (graf 12) úměrné. Panel MY 145-CIGS vykazuje nižší citlivost při východu a západu slunce, což není dáno způsobem instalace. Chování tegoly (graf 13) je podobné jako u MY 145-CIGS. Systém ráno nabíhá později a večer dříve odpadá.



Graf 13 - Tegola a pozicioner - průběh výkonu o slunečném dnu

Průběhy tří panelů a tegoly za ideálně slunečného počasí představují křivku podobnou horní půlně sinusoidy s pozvolným nástupem, dosažením maxima a pozvolným poklesem. Naproti tomu výkonová křivka u pozicioneru má strmou náběžnou a sestupnou hranu s dlouhou dobou setrvání na poměrně konstantní úrovni výkonu. Křivka se blíží spíše obdélníkovému průběhu. Doba činnosti je oproti stacionárním systémům delší o více než hodinu jak při východu, tak i západu slunce. Elektrická energie rovná plochám pod křivkou je u pozicioneru meziročně asi o 40 % vyšší než u stejných panelů umístěných stacionárně. Velkou výhodou je rovněž samočinné natočení panelů do horizontální polohy v případě oblačnosti, kdy je panely využita alespoň difusní část světla. U velkých polohovacích systémů dojde k natočení do horizontální polohy rovněž při detekci nebezpečného větru, čímž je celý systém ochráněn proti poškození.

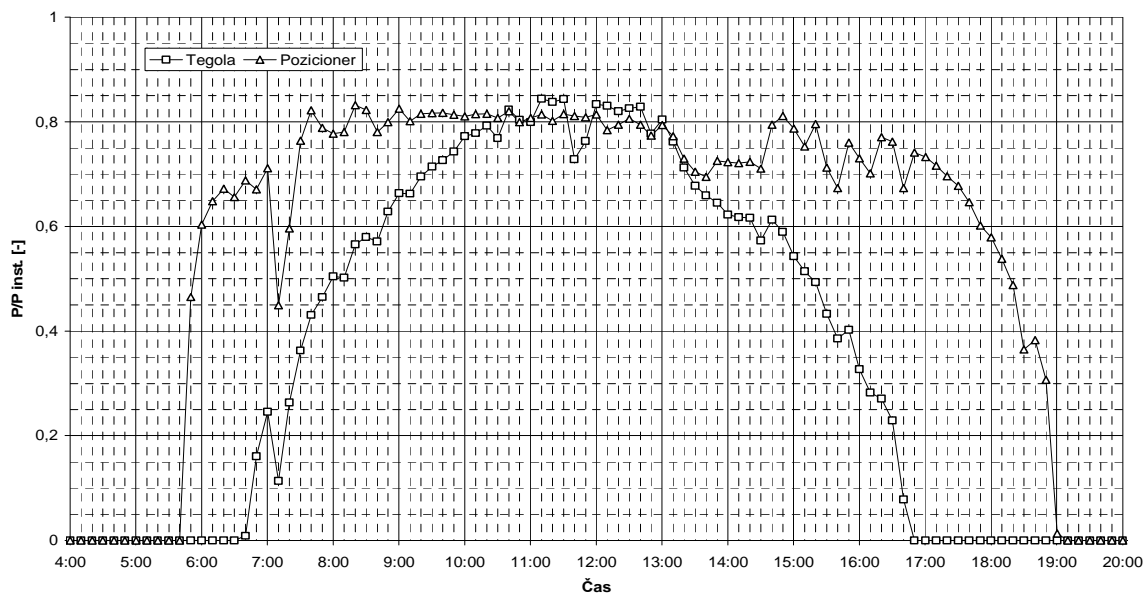
Tři panely - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočten na instalovaný výkon



Graf 14 - Tři panely - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočten na inst. výkon

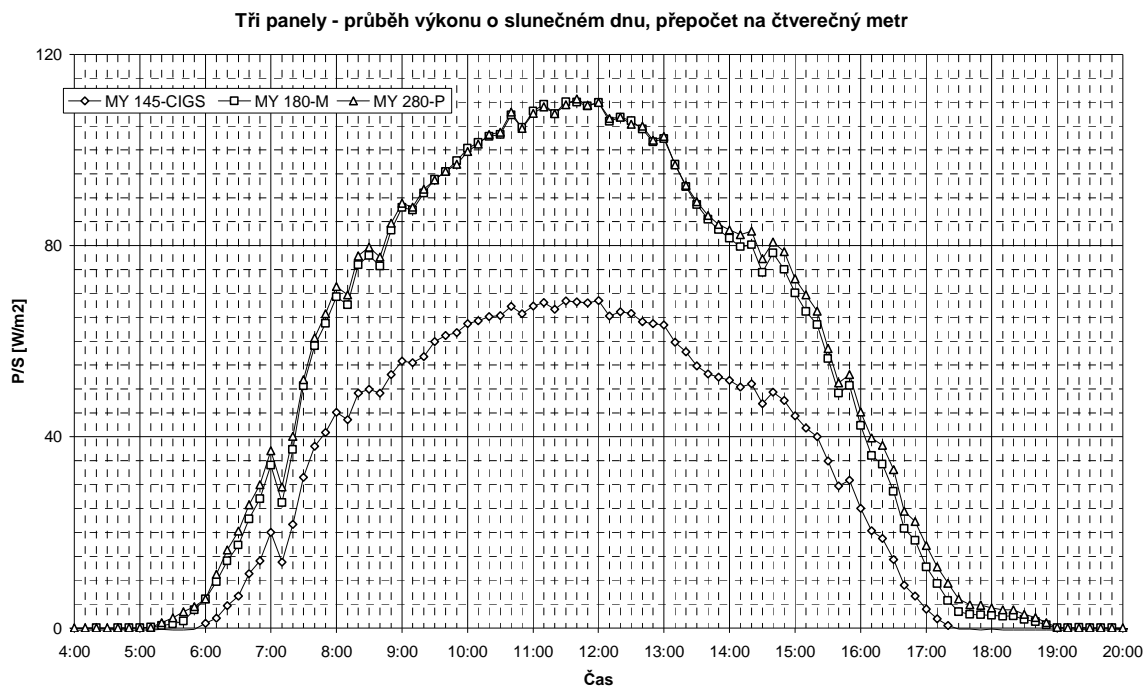
Dalším neméně důležitým ukazatelem je průběh výkonu přepočítaný na tzv. instalovaný výkon (graf 14 a 15). Přestože 7.5.2011 přibližně v 12:00 přesáhl sluneční svit dopadající pod úhlem 45° 1000 W/m^2 , ani jeden z panelů nedosáhl výrobcem garantovaný výkon. Zde je však nutné se pozastavit. Výkon se měří za měniči a není známo spektrální složení dopadajícího světla.

Tegola a pozicioner - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočten na instalovaný výkon

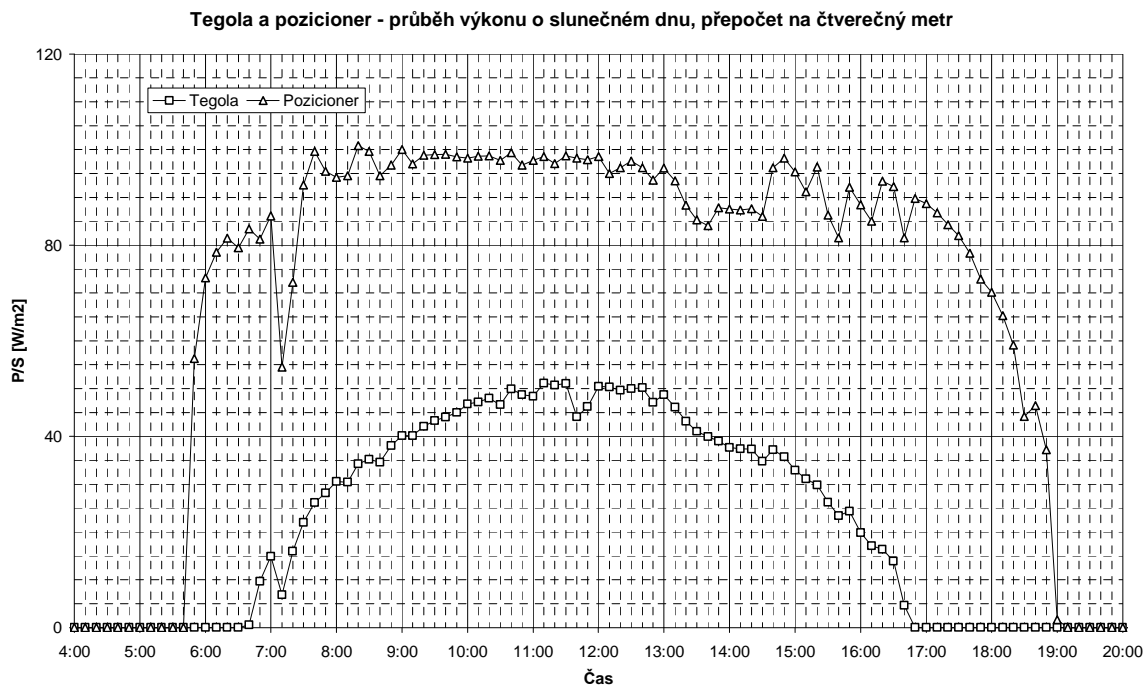


Graf 15 - Tegola a poz. - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočten na inst. výkon

Systemy dosahují zhruba 75-80 % výrobcem udávaných výkonů. Nejlepších výsledků dosahuje tegola s necelými 85 procenty. Při započítání účinnosti měničů bychom se pravděpodobně dostali na výrobcem deklarované hodnoty.

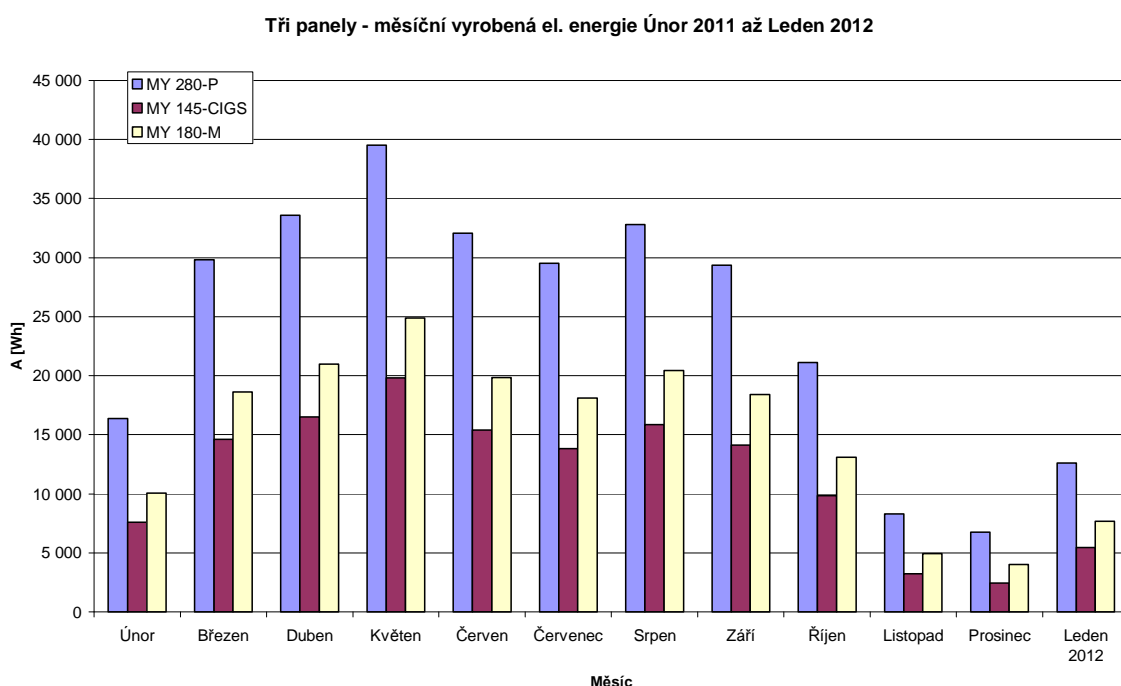


Graf 16 - Tři panely - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočít na m²



Graf 17 - Tegola a poz. - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočít na m²

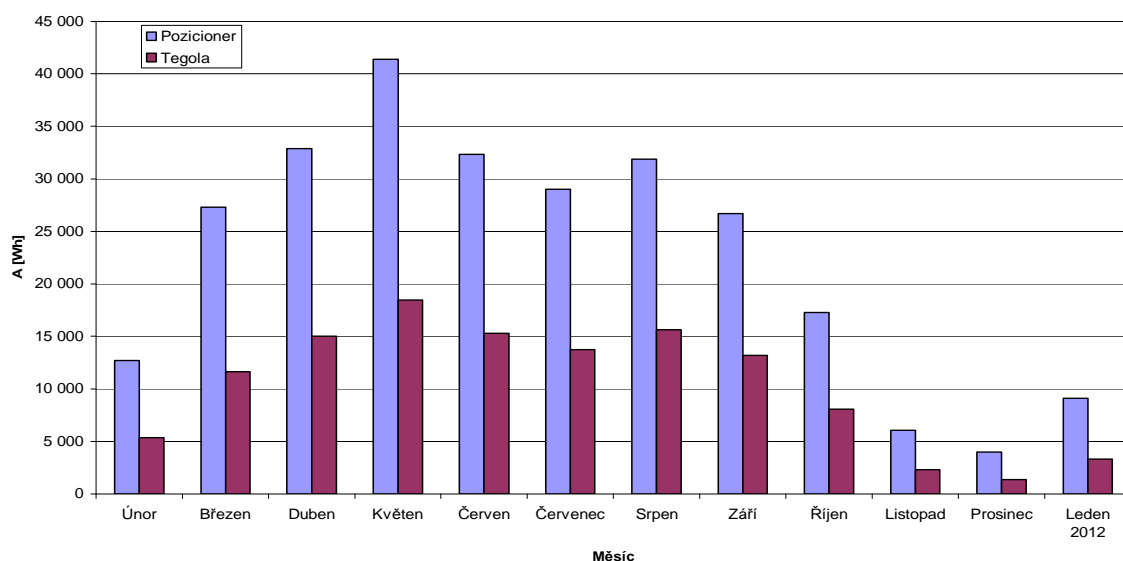
Mezi nejzajímavější parametry patří přepočtený výkon na jednotku plochy. Z těchto průběhů (graf 16 a 17) jsou jasně patrné rozdíly v účinnosti jednotlivých panelů či technologií. Panely MY 280-P a MY 180-M mají poměr P/S velmi podobný (špičkově 110 W/m²), nepatrně vyšší je pro panel MY 280-P. Oproti tomu poměr P/S panelu MY 145-CIGS nedosahuje ani 70 W/m². Nejnižšího poměru P/S dosahuje tegola, což se dalo vzhledem k technologii panelů předpokládat. Pozicioner i vzhledem k poněkud starším panelům dosahuje solidní hodnoty 100 W/m².



Graf 18 - Tři panely - měsíční vyrobená el. energie Únor 2011 až Leden 2012

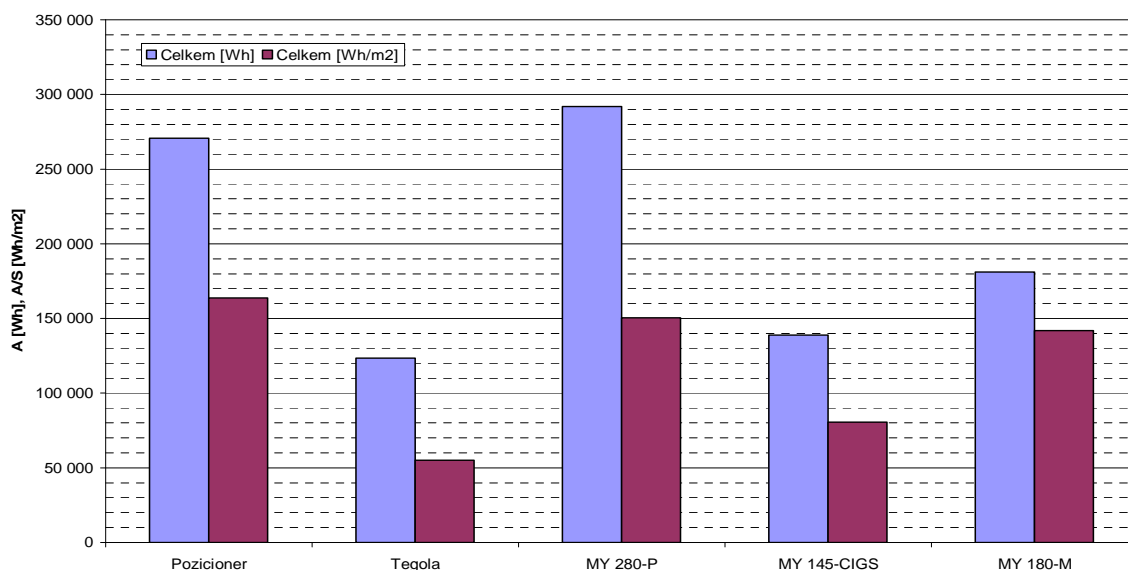
Na grafech 18 a 19 vidíme výrobu měřených systémů vždy za měsíc za sledované období. Z grafů je jasně patrný rozdíl výroby v zimních a letních měsících a to jak u stacionárních systémů, tak pozicioneru. Nejvyšších hodnot výroby je dosaženo v květnu a to pravděpodobně z důvodu nižšího znečištění atmosféry, menší oblačnosti a nižší teploty vzduchu, respektive panelů. Tohoto jevu je dosahováno každoročně již po několik let. Naopak nejnižší výroby se tradičně dosahuje v zimních měsících. Pro sledované období a rovněž po několik let nazpátek v prosinci. Důvod je zjevný. Doba slunečního svitu a oblačnost.

Tegola a pozicioner - měsíční vyrobená el. energie Únor 2011 až Leden 2012



Graf 19 - Tegola a poz. - měsíční vyrobená el. energie Únor 2011 až Leden 2012

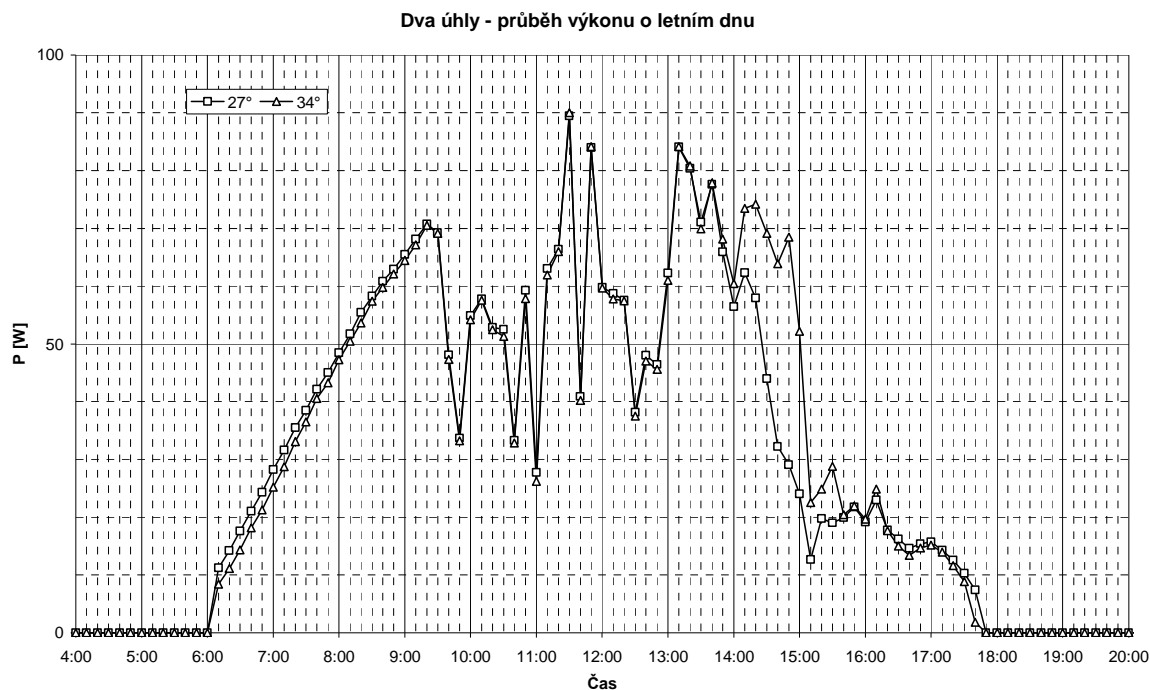
Celková roční vyrobená energie



Graf 20 – Tegola, pozicioner, tři panely - celková roční vyrobená energie

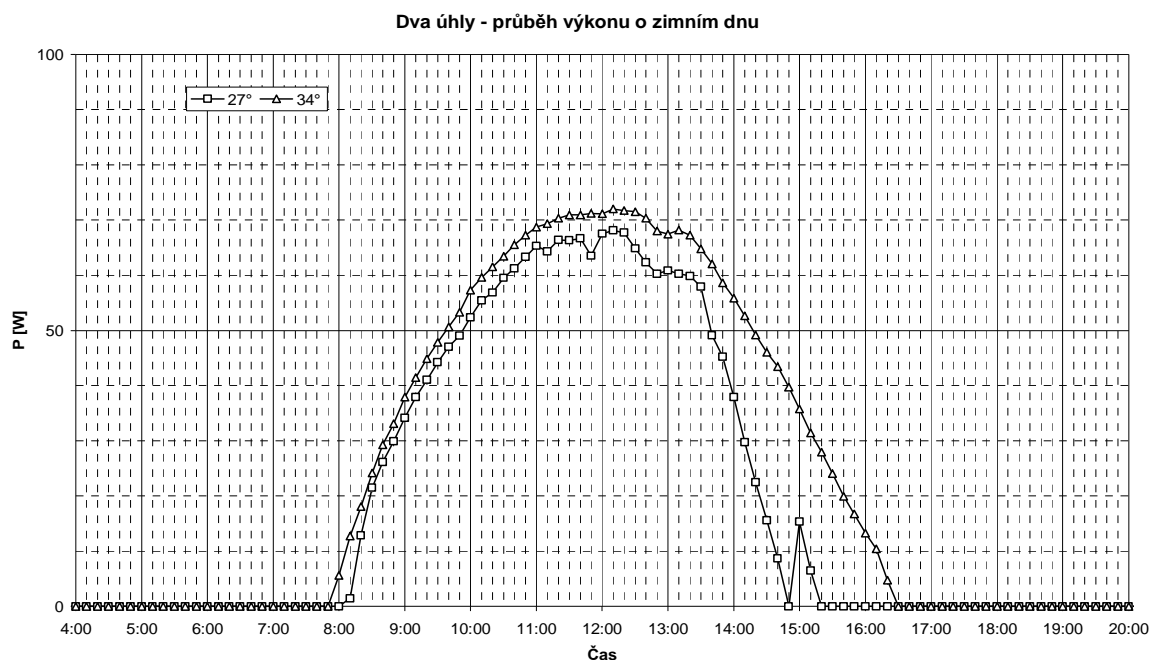
Z grafu 20 je jednoznačně patrné, že meziročně největší množství el. energie vyrobí panel MY 280-P. Ovšem pozicioner dosahuje největšího poměru A/S a to zhruba trojnásobně vůči tegole, která má poměr nejnižší. Monokrystalický panel MY 180-P je překvapivě z tohoto pohledu nepatrně horší než polykrystalický. Poměr u panelu MY 145-CIGS je přibližně poloviční oproti polykrystalickému MY 280-P.

6.2.1 Dva úhly



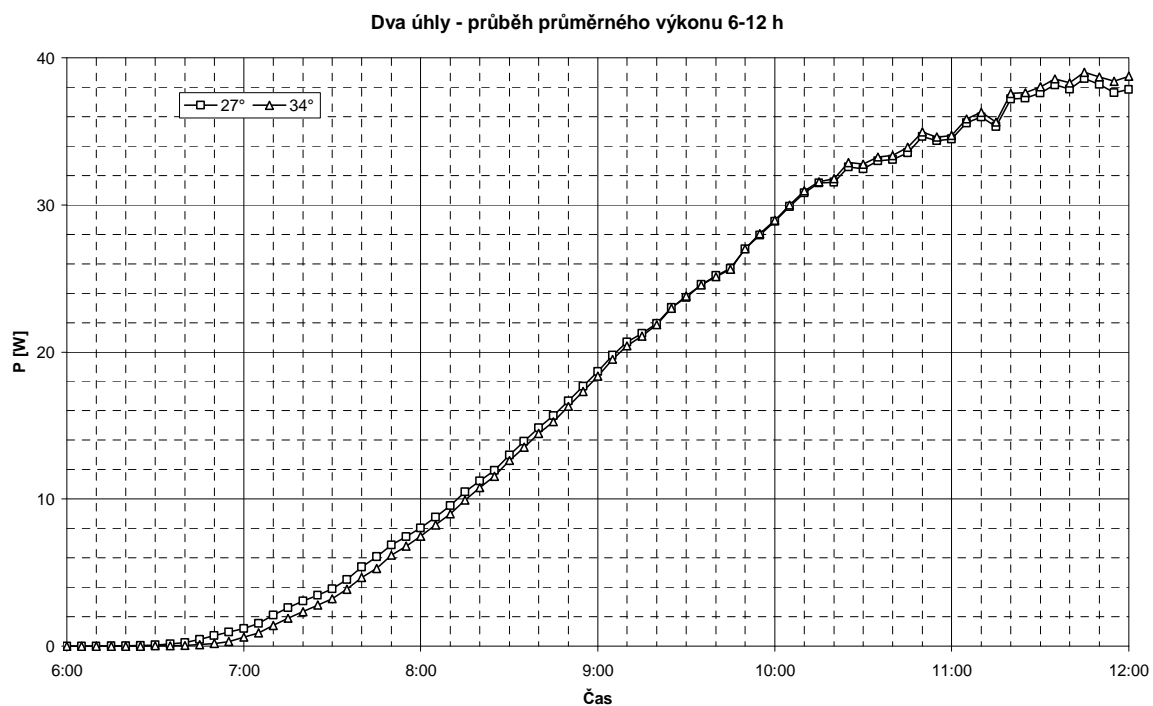
Graf 21 - Dva úhly - průběh výkonu o letním dnu

Z technicko-ekonomických důvodů systém vznikl úpravou sledovacího zařízení tracker. Jak je ovšem patrné z obr. 21 a grafů 21 a 22, systém, hlavně však panel pod úhlem 27°, je v průběhu dne částečně zastíněn. Vzhledem k možnostem katedry nebylo jiné řešení údajně možné. Z grafů jasně vyplývá, že zastínění nastává mezi 12. a 14. hodinou. Z hlediska analýzy dat jsem tedy musel odstranit veškerá data po 12. hodině a ze zbytku dat provést výpočet průměrného výkonu. Mezi grafy 21 a 22 je jasně patrný rozdíl ve výrobě v zimě a v létě. V létě (graf 21) je patrný vyšší výkon pro panel instalovaný pod úhlem 27°. Rozdíl je však mnohem výraznější u zisku panelu instalovaném pod úhlem 34° v zimě oproti 27° panelu. Jak bude rozvedeno dále, vypočítaný optimální instalační úhel pro sledované období 1.2.2011 až 31.1.2012 činí 29,9°. Z tohoto výsledku lze usuzovat, že by za sledované období měl mít vyšší energetický zisk panel instalovaný pod úhlem 27°. Úhel 27° byl vypočítán jako optimální instalační úhel pro rok 2008. Zajímavým zjištěním je poměrně velký rozdíl vypočítaných úhlů pro dvě různá období (27 a 29,9°).



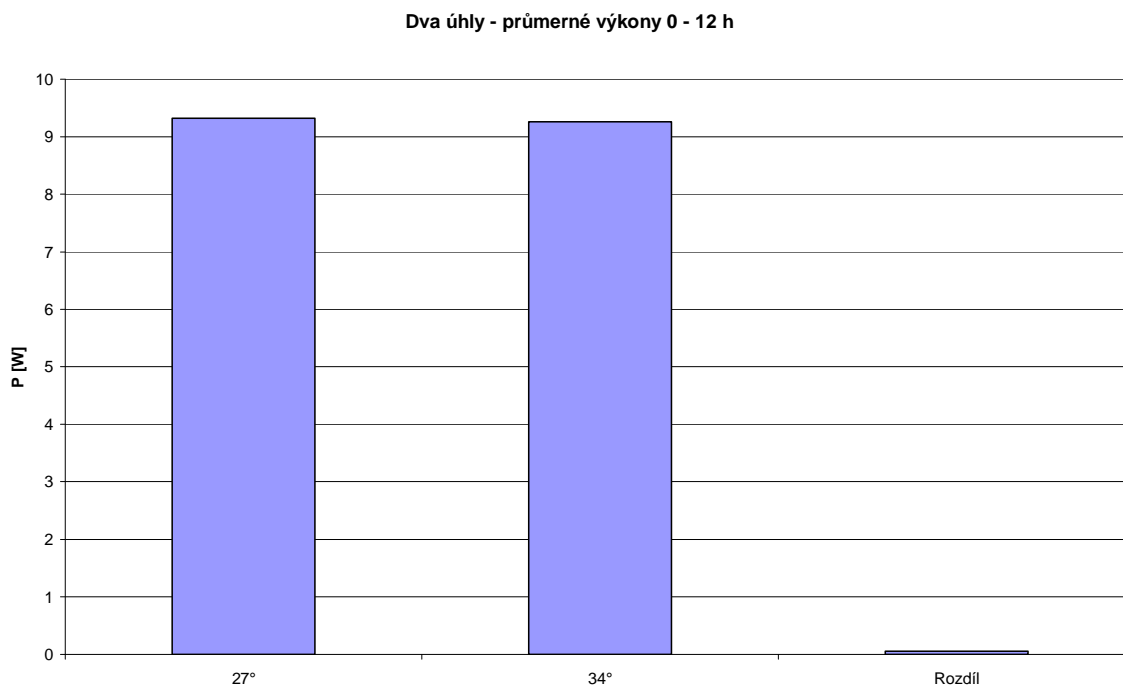
Graf 22 - Dva úhly - průběh výkonu o zinním dnu

Na grafu 23 vidíme průběh průměrného výkonu v mezidobí o 6 do 12h. Plochy mezi křivkami odpovídají rozdílu vyrobené energie. Na grafu je patrné, že plocha mezi křivkami v době mezi 6 a 10 h je větší než plocha od 10 do 12 h. Vypočítaný rozdíl činí 0,61 % ve prospěch panelu instalovaného pod úhlem 27°.



Graf 23 - Dva úhly - průběh průměrného výkonu 6-12 h

Lze předpokládat, pokud by panely byly nainstalovány tak, aby nedocházelo k jejich zastínění, že křivka od 12 h do 18 h bude zrcadlovou kopií křivky od 6 do 12 h a vypočítaný rozdíl – zisk (graf 24) bude za celé sledované období správný.



Graf 24 - Dva úhly - průměrné výkony 0 -12 h

Panely dosahují za sledované období mezi 0 -12 h průměrných výkonů 9,32 W pro 27° panel a 9,26 W pro 34° panel. Protože e panely mezi 0 – 6 h el. energii nevyrábí, činil by průměrný výkon za období mezi 6 -12 h dvojnásobek. Relativní procentuální rozdíl zůstává samozřejmě stejný. Přestože se zisk 0,6 % jeví jako zanedbatelný z hlediska výkonu několika set wattů (u tohoto systému činí teoretický meziroční zisk asi 500 Wh el. en.), u velkých fotovoltaických systémů s instalovanými megawatovými výkony je energetický a z toho plynoucí finanční zisk podstatný. Zjištěné závěry podporují hypotézu, že obvykle udávaný optimální úhel instalace 34° je nesprávný. Toto tvrzení ovšem může mít pouze lokální charakter daný specifickými vlastnostmi místního podnebí, znečištěním atmosféry polétavým prachem apod. Stanovení optimálního úhlu instalace z dlouhodobého hlediska bude rozvedeno v dalších kapitolách.

6.3 20 kWp FV systém – 1.2.2011 až 31.1.2012

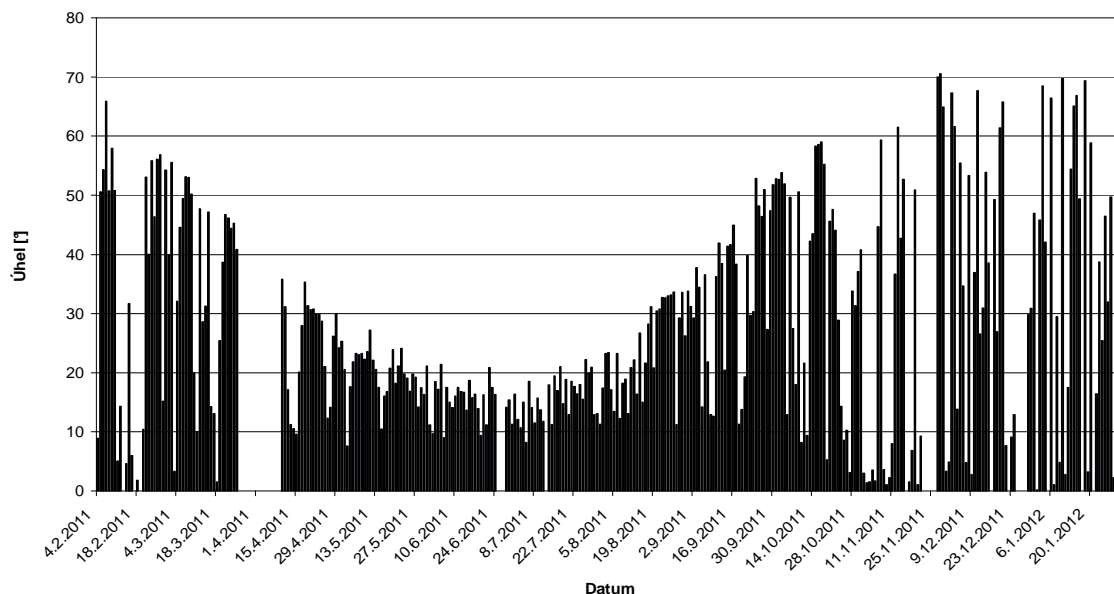
V kapitole 6.1 byly podrobně uvedeny výsledky měření a závěry z nich plynoucí za rok 2008. Tyto závěry předurčily další směr výzkumu, hlavně však ověření hypotézy, že obecně udávaný optimální úhel instalace 34° je nesprávný. Výpočet optimálního úhlu instalace z dlouhodobého hlediska zahrnuje období let 2008-2011 včetně, ostatní data korespondují z důvodu porovnatelnosti s daty z experimentálních systémů, tj. období od 1.2.2011 do 31.1.2012.

Tab. 3 – Optimální vypočítané úhly instalace za období let 2008-2011

Rok	Hor. osvit [W/m ²]	Osvit pole [W/m ²]	G.osvit [W/m ²]	Opt. instl. úhel [°]	Počet měř. za rok
2008	151,07	161,02	169,40	26,9	39489
2009	165,22	117,01	165,22	0,1	38496
2010	152,23	143,71	160,55	18,5	41933
2011	157,53	174,43	181,01	29,5	39388

Tab. 3 zobrazuje průměrné hodnoty horizontálního osvitu, osvitu pole (pod úhlem 45°) a osvitu při optimálním úhlu, dále pak počet měření za rok a vypočítané optimální úhly instalace pro daná období a dobu měření od 3:50 do 23:00. Výpočet optimálního úhlu instalace (tab. 3) za období let 2008-2011 přinesl velmi překvapující zjištění, že se tento úhel meziročně výrazně mění. Výsledek za rok 2011 se od výsledku za období 1.2.2011 až 31.1.2012 liší o 0,4°. Naprosto vybočující výsledky za roky 2009 a 2010 jsou ovšem dány chybou senzoru (špatný kontakt). Chyba byla zjištěna a oprava provedena až v březnu 2010. Výsledky za roky 2009 a 2010 jsou tedy neplatné. Z výsledků za roky 2008 a 2011 lze usuzovat, že optimální úhel instalace činí zhruba 28°, což je podstatně méně, než obecně udávaných 34°. Tyto výsledky byly potvrzeny experimentálním měřením na systému „dva panely“ v období 1.2.2011 až 31.1.2012. Závislost optimálního úhlu instalace (denní vážené průměry úhlů dopadajícího slunečního záření) na čase v průběhu měřeného období zobrazuje graf 25. Prázdná místa jsou způsobená nejen výpadky měření, ale rovněž velkou oblačností a z toho plynoucím nulovým či záporným úhlem dopadajícího záření.

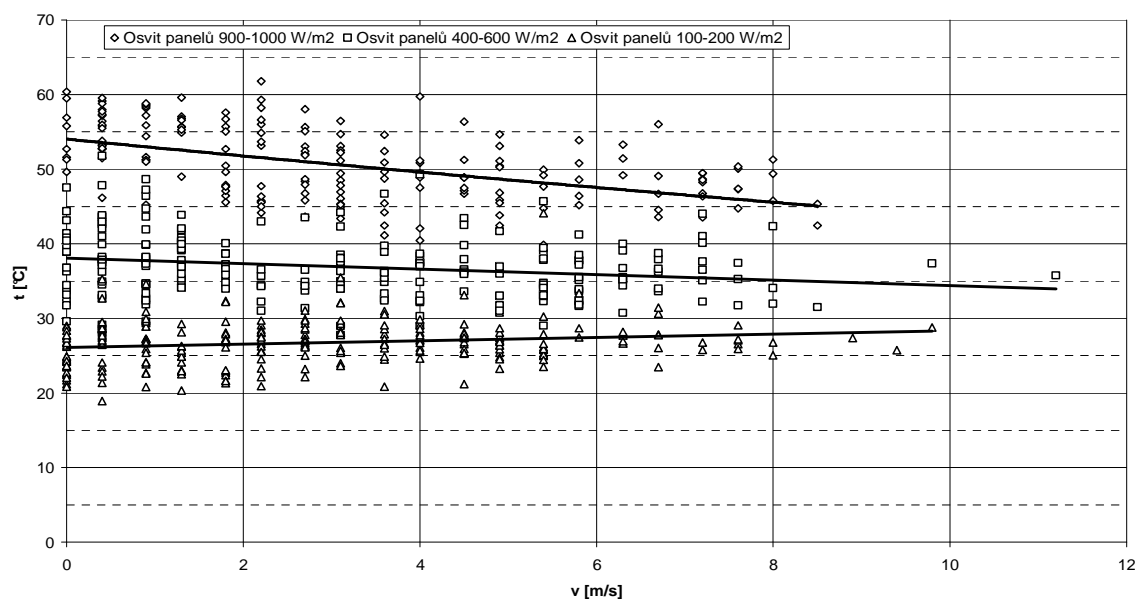
Denní vážené průměry úhlů dopadajícího slunečního záření



Graf 25 - Denní vážené průměry úhlů dopadajícího slunečního záření

Z výsledků měření za rok 2008 známe rozdíl v účinnosti panelů v závislosti na teplotě panelů, konkrétně mezi 10 a 50 °C. Rozdíl odpovídá 15 %. Z tohoto důvod byl rovněž analyzován vliv rychlosti větru na ochlazování (teplotu) panelů. Vhodný způsob instalace může přispět k lepšímu ochlazování panelů a tím ke zvýšení účinnosti celého systému.

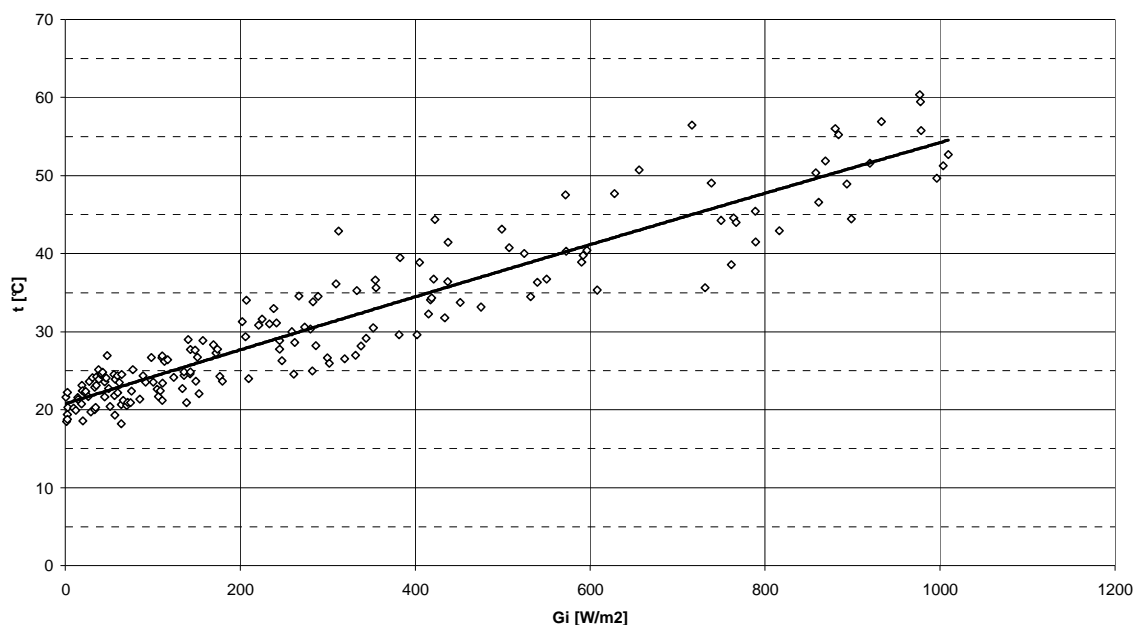
Závislost teploty panelů na rychlosti větru, teplota vzduchu 19-21 °C



Graf 26 – Závislost teploty panelů na rychlosti větru

Graf 26 znázorňuje závislost teploty panelů na rychlosti větru při teplotě ve stínu 19-21 °C a třech rozsazích intenzit. Při nejnižším rozsahu intenzit (100 – 200 W/m²) je zjištěná závislost kladná, což si vysvětlují pravděpodobným posunem spektra dopadajícího záření k infračervené oblasti vlivem větší oblačnosti spojené s vyššími rychlostmi větru. V důsledku tak může dojít k většímu ohřívání panelů při stejných hodnotách intenzit. Jedná se ovšem o nepodloženou hypotézu. S vyššími intenzitami (graf 26 a 27) se střední teplota panelů dle předpokladů zvyšuje a rovněž roste význam vlivu rychlosti větru na ochlazování panelů. Při osvitech 900-1000 W/m² je rozdíl teplot panelů mezi nulovou rychlostí větru a 9 m/s zhruba 10 °C.

Teplota panelů v závislosti na osvitu, rychlost větru 0 m/s, tepl. ve stínu 19-21 °C

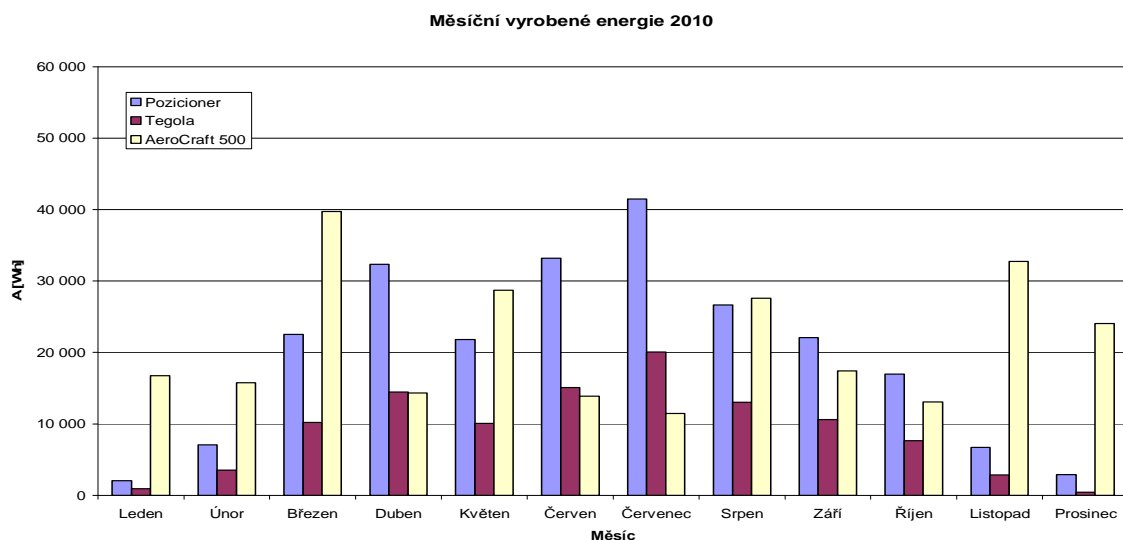


Graf 27 – Teplota panelů v závislosti na osvitu, rychlost větru 0 m/s, teplota ve stínu 19-21 °C

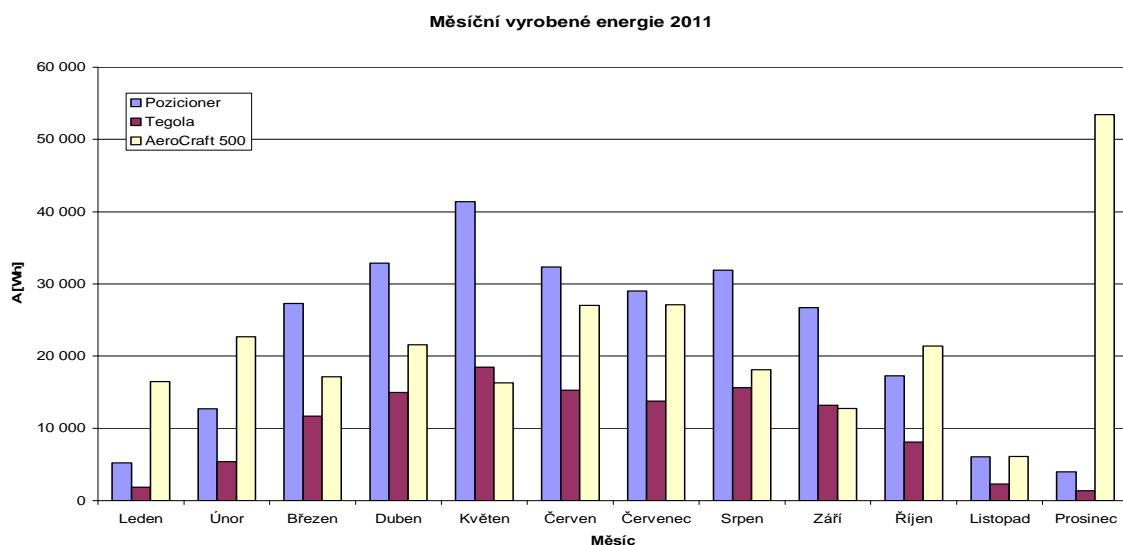
Lze konstatovat, že vhodnou instalací umožňující dobrou cirkulaci vzduchu můžeme přispět k ochlazování panelů zvýšením jejich účinnosti zejména v oblasti nejvyšších intenzit, kdy se předpokládá rovněž nejvyšší výroba. Uvedené opatření rovněž sníží možnost dlouhodobé tepelné degradace. [2]

6.4 Větrná elektrárna AeroCraft 500

Největší zastoupení v miniparku obnovitelných zdrojů mají fotovoltaické systémy, nedílnou součástí je však i malá větrná elektrárna AeroCraft 500. Existuje obecný názor, že se výroba elektrické energie z větrných a fotovoltaických elektráren vhodně doplňuje i na lokální úrovni. Z tohoto důvodu byl analyzován soudobý provoz větrné elektrárny a FV systému. Měsíční výroby větrné elektrárny za roky 2010 – 2011 v porovnání s tegolou a pozicionerem zobrazují grafy 28 a 29.

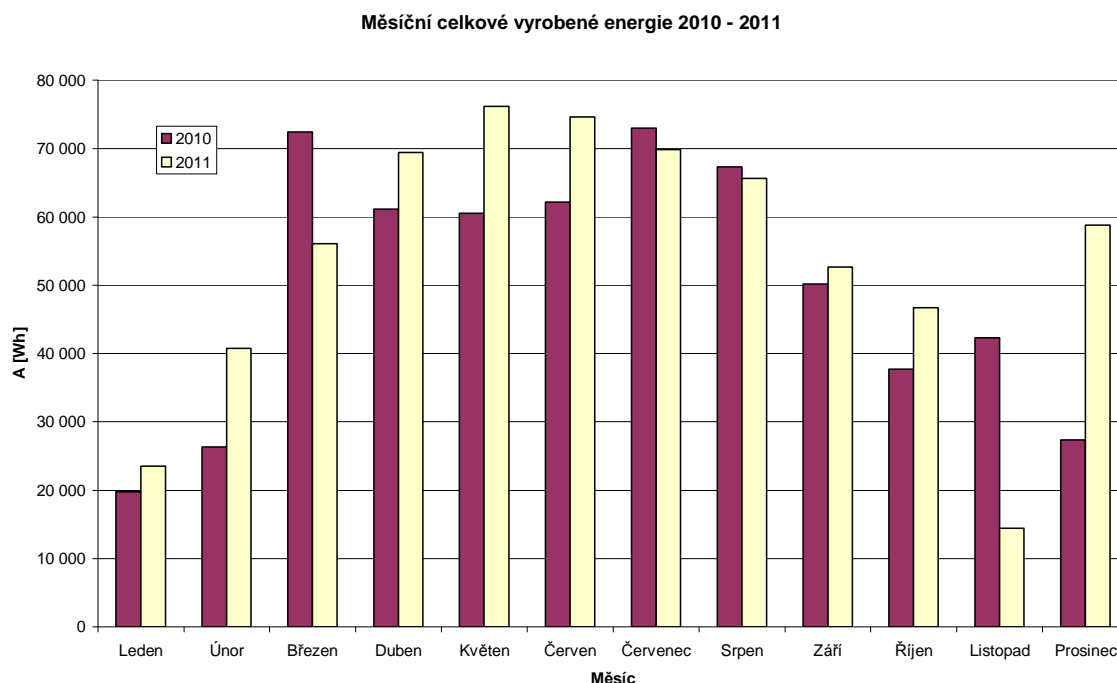


Graf 28 - Měsíční vyrobené energie 2010



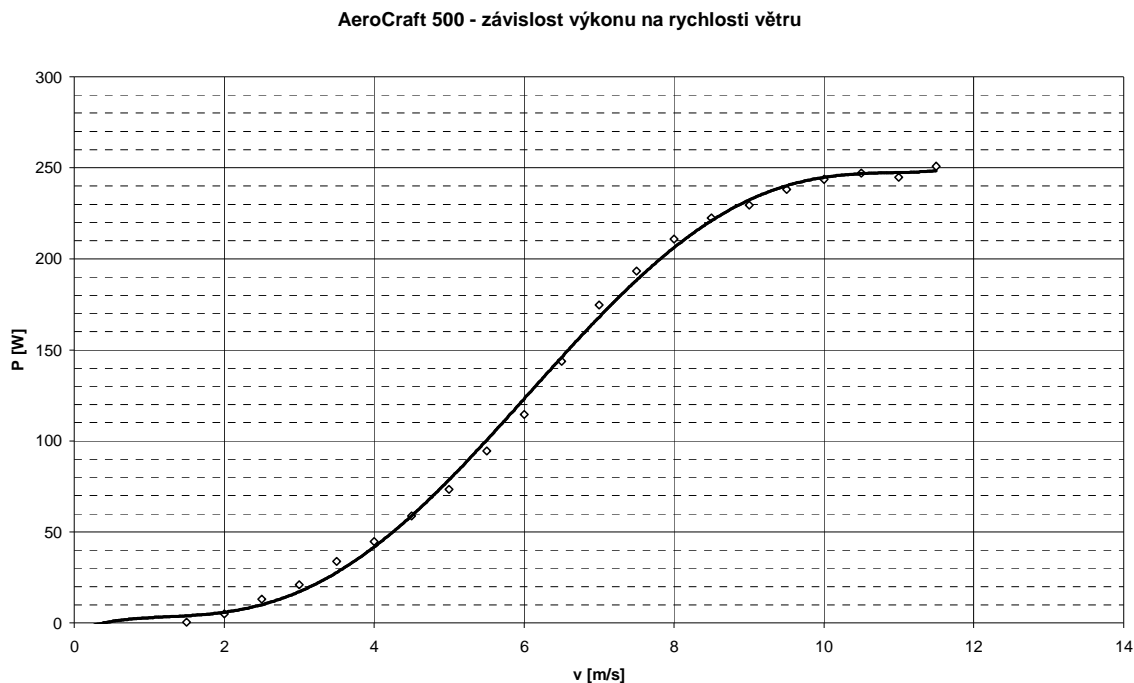
Graf 29 - Měsíční vyrobené energie 2011

Jak je z grafů patrné, tak v převládajícím počtu měsíců elektrická energie vyrobená větrnou elektrárnou koresponduje s el. en. vyrobenou FV systémy. Výjimkou je např. prosinec 2011, kdy byla naměřena největší výroba malou větrnou elektrárnou v její historii. Pokud se na vyrobené energii podíváme podrobněji, dospějeme k názoru, že je často tzv. vítr poháněn sluncem. Větrná elektrárna tedy pracuje v období, kdy zároveň pracují FV systémy (graf 30). Přesto že je instalovaný výkon větrné elektrárny 500 W, což je téměř dvojnásobek instalovaného výkonu tegoly a pozicioneru dohromady, tak celková vyrobená množství el. energie (tegola, pozicioner a malá větr. el.) mají charakter výrob z FV systémů. Z tohoto měření vyplývá, že se předpokládaná vhodná součinnost FV systémů a větrných elektráren nepotvrdila (větrné elektrárny měly pracovat v období, kdy nepracuje FV). Toto zjištění je zásadní především z pohledu ostrovního provozu. Z krátkodobého hlediska, tj. v průběhu dne se rovněž zjistilo, že se západem slunce dochází obvykle ke zpomalení rychlosti větru a snížení výroby větrné elektrárny. Teorie, že FV systémy budou pracovat ve dne a větrné elektrárny v noci, je rovněž (alespoň v měřené lokalitě) vyvrácena.



Graf 30 - Měsíční celkové vyrobené energie 2010 - 2011

Pro úplnost doplňuji charakteristiku závislosti výroby větrné elektrárny AeroCraft na rychlosti větru.



Graf 31 - AeroCraft 500 - závislost výkonu na rychlosti větru

Na grafu 31 je vyobrazena charakteristika závislosti výroby malé větrné elektrárny AeroCraft 500. Tvar charakteristiky odpovídá teoretickým předpokladům pro elektrárnu s pevným naklopením listů rotoru. Pomalý nelineární rozběh od cca 2 m/s, lineární část v oblasti středních rychlostí větru přecházející do logaritmického průběhu ke konci charakteristiky. Zda by přešla charakteristika v klesající se nepodařilo vzhledem k rychlostem větru v měřené lokalitě změřit. Předpokládám, že z hledem k systému vyosení rotoru mimo vektor rychlosti větru při nadměrných rychlostech u této větrné elektrárny by křivka zůstala neklesající. Důležitým zjištěním je dodávaný výkon. Při 9 m/s by měla elektrárna dodávat dle technické specifikace výrobce nominální výkon 500 W, naměřen byl však poloviční. Stejně tak je při nulové rychlosti větru výkon záporný, zhruba -1,2 W. Obojí lze částečně vysvětlit tím, že je systém primárně postaven na dobíjení olověných baterií a pro účely provozu je doplněn o další měniče a měřící zařízení. Tato zařízení mají určitou vlastní spotřebu a měniče rovněž účinnost. Že by však celková účinnost systému klesla po 50 % je těžko uvěřitelné.

7 Závěr

Přínosem práce je vlastní analýza vlivu vnějších podmínek a způsobu instalace na provoz FV systémů.

Výzkum jsem realizoval na FV systémech elektrotechnické fakulty a to z několika důvodů. Bylo možné na jedné lokalitě měřit různé typy FV systémů, větrnou elektrárnu a rovněž meteorologická data a naměřené údaje integrovat do jednoho měřicího zařízení. Měřicí systém jsem vytvořil na platformě průmyslového počítače a nakonfiguroval dle požadavků výzkumu. Za správnost dat jsem si odpovídal sám a nemusel jsem se spoléhat na cizí měření. Rovněž jsem mohl modifikovat některé FV systémy pro účely tohoto výzkumu (systém dva panely apod.). Pro velký zájem nejen technické veřejnosti jsem některá data online presentoval rovněž na webovém portálu meteo.zcu.cz.

Předmětem disertační práce byl výzkum vlivů nejen klimatických, ale též způsobu instalace a provozu. Pro účely výzkumu bylo měření prováděno několik let a během této doby bylo zaznamenáno a vyhodnoceno nepřeborné množství dat. Analýzou, výpočty a převedením dat do grafických podob byly tyto vlivy vyhodnoceny a následně potvrzeny či vyvráceny prvotní teorie a hypotézy. Potvrdilo se například, že optimální úhel instalace nečiní běžně udávaných 34°, ověřil se v reálných podmínkách vliv oteplení panelů na účinnost, vliv rychlosti větru na ochlazování panelů atp. Byly naměřeny a porovnány charakteristiky různých typů FV panelů (monokrystalické, polykrystalické, amorfni, CIGS) a to jak na pevné konstrukci, tak pozicioneru. V neposlední řadě byl rovněž porovnán soudobý provoz FV systému a větrné elektrárny s vyloučením některých běžně uznávaných teorií.

Získané poznatky lze velmi dobře prakticky aplikovat jak u velkých systémů zapojených do distribuční sítě, tak i pro provoz malých ostrovních systémů. Do budoucna by bylo vhodné analyzovat vliv FV systémů na síť, obzvláště stavy vznikající při nabíhání a vypínání měničů (flickr, harmonické zkreslení atd.).

8 Seznam literatury a zdrojů informací

- [1] Field H.: Solar Cell Spectral Response Measurement Errors Related to Spectral Band Width and Chopped Light Waveform in 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, September 29 - October 3, 1997, Anaheim, California
- [2] Macdonald D., Cuevas A.: THE TRADE-OFF BETWEEN PHOSPHORUS GETTERING AND THERMAL DEGRADATION IN MULTICRYSTALLINE SILICON in 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow May 1-5 2000
- [3] Teufel D.: Fotovoltaika, http://moon.felk.cvut.cz/~pju/Jak/_phys/f660/
- [4] Dankoff W., Schwartz J.: PV Longevity & Degradation in Home Power Magazine, Apr/May 2007, <http://www.homepower.com>
- [5] Erlebach J.: Diplomová práce - Studie možností autonomního zásobování rodinného domku energií
- [6] <http://www.sany.cz>
- [7] <http://www.tretpol.cz>
- [8] <http://www.czrea.org>
- [9] <http://www.energ.cz>
- [10] <http://www.alter-eko.cz>
- [11] <http://www.eles-solar.cz>
- [12] <http://www.energyproject.com>
- [13] Vaněk J.: Diplomová práce - Posouzení vlivu fotovoltaického systému na síť
- [14] <http://www.solartec.cz>
- [15] Green M.: Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond, 2002
- [16] <http://www.cez.cz>
- [17] Bubeník F., Pultar M.: Matematické vzorce a metody, ČVUT 1994

9 Publikační činnost

[1] Škorpil, J., Erlebach, J., Dvorský, E. Některé výsledky výzkumu na fotovoltaických systémech a větrné elektrárně. In Proceedings of the 6th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering - Elektroenergetika 2011. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2011. s. 118-121. ISBN: 978-80-553-0724-4

[2] Erlebach, J. Teplotní a spektrální charakteristiky fotovoltaických článků. In Elektrotechnika a informatika 2008. Část 3., Elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. s. 25-26. ISBN: 978-80-7043-703-2

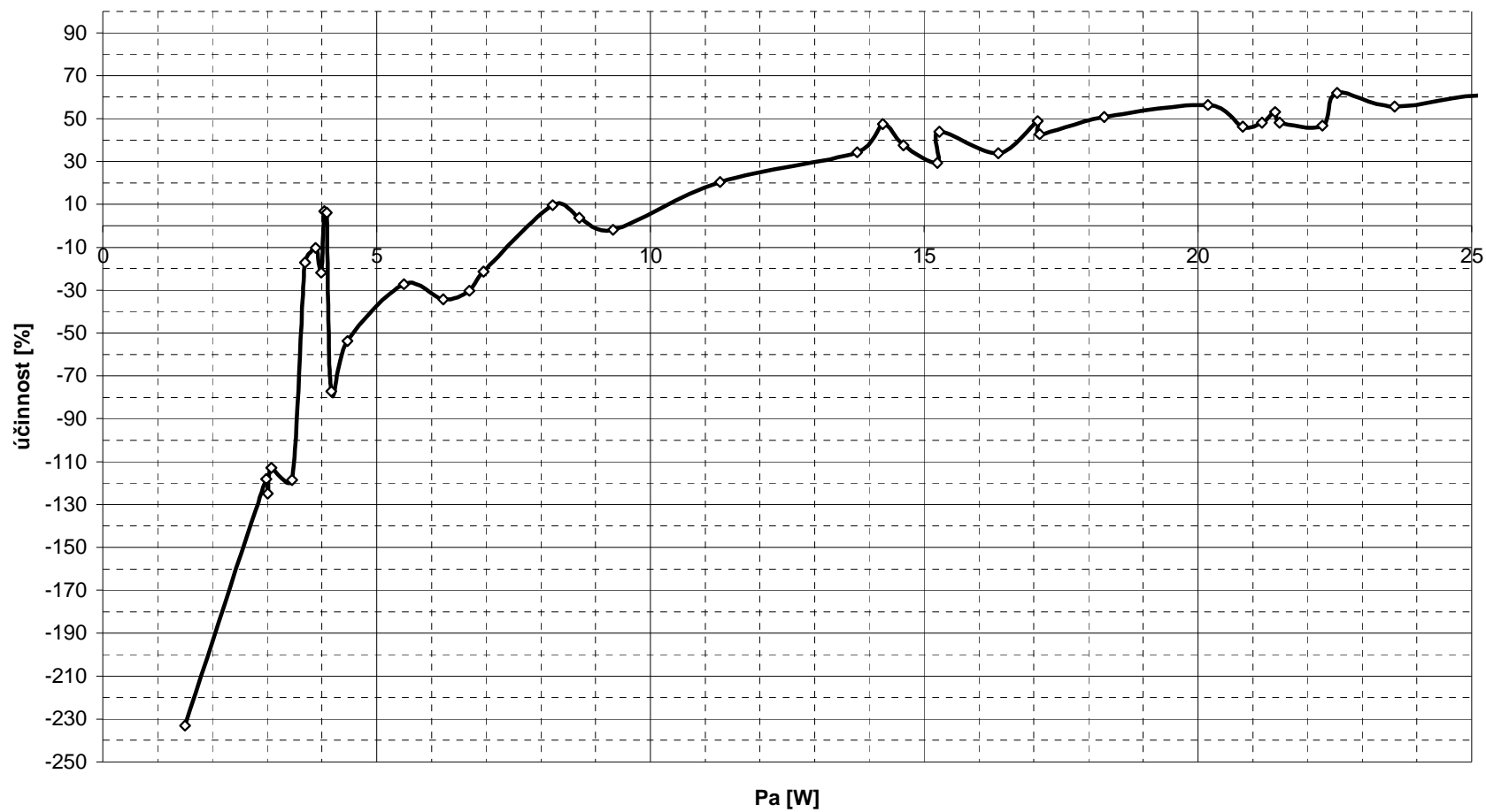
[3] Dvorský, E., Škorpil, J., Erlebach, J. Možnosti zvýšení připojitelného výkonu z obnovitelných energetických zdrojů do distribučních sítí. In Elektroenergetika 2009. Košice: Technical University, 2009. s. 413-416. ISBN: 978-80-553-0237-9

[4] Erlebach, J. Vliv klimatických podmínek na účinnost přeměn energií u obnovitelných zdrojů energie. Plzeň : Západočeská univerzita, 2009

[5] Erlebach, J. Climatic Conditions Influences on Conversion Efficiency of Renewable Power Resources. Plzeň, 2010., ISBN: 978-80-7043-893-0

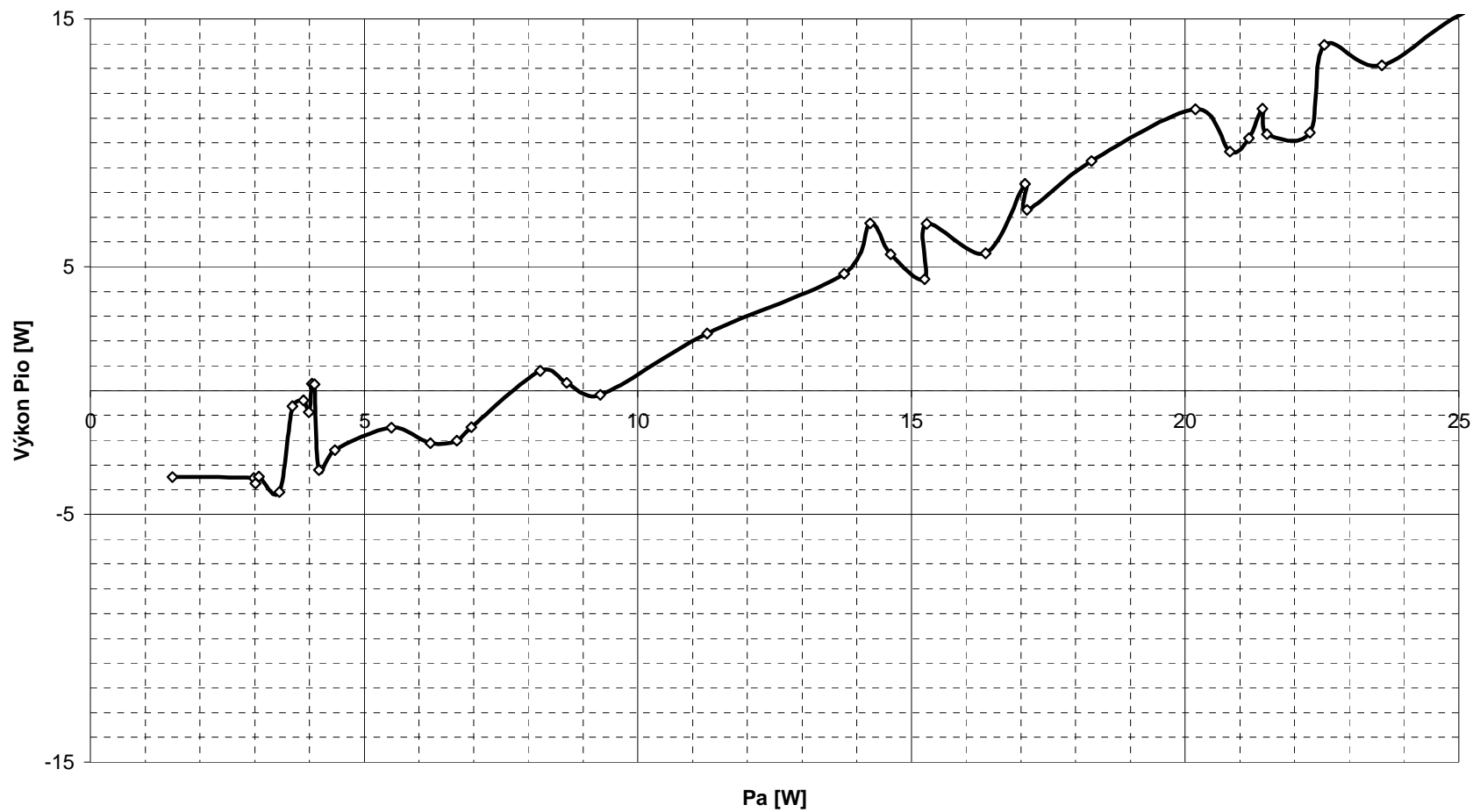
10 Příloha – grafy v plné velikosti

Účinnost měniče - rozběh



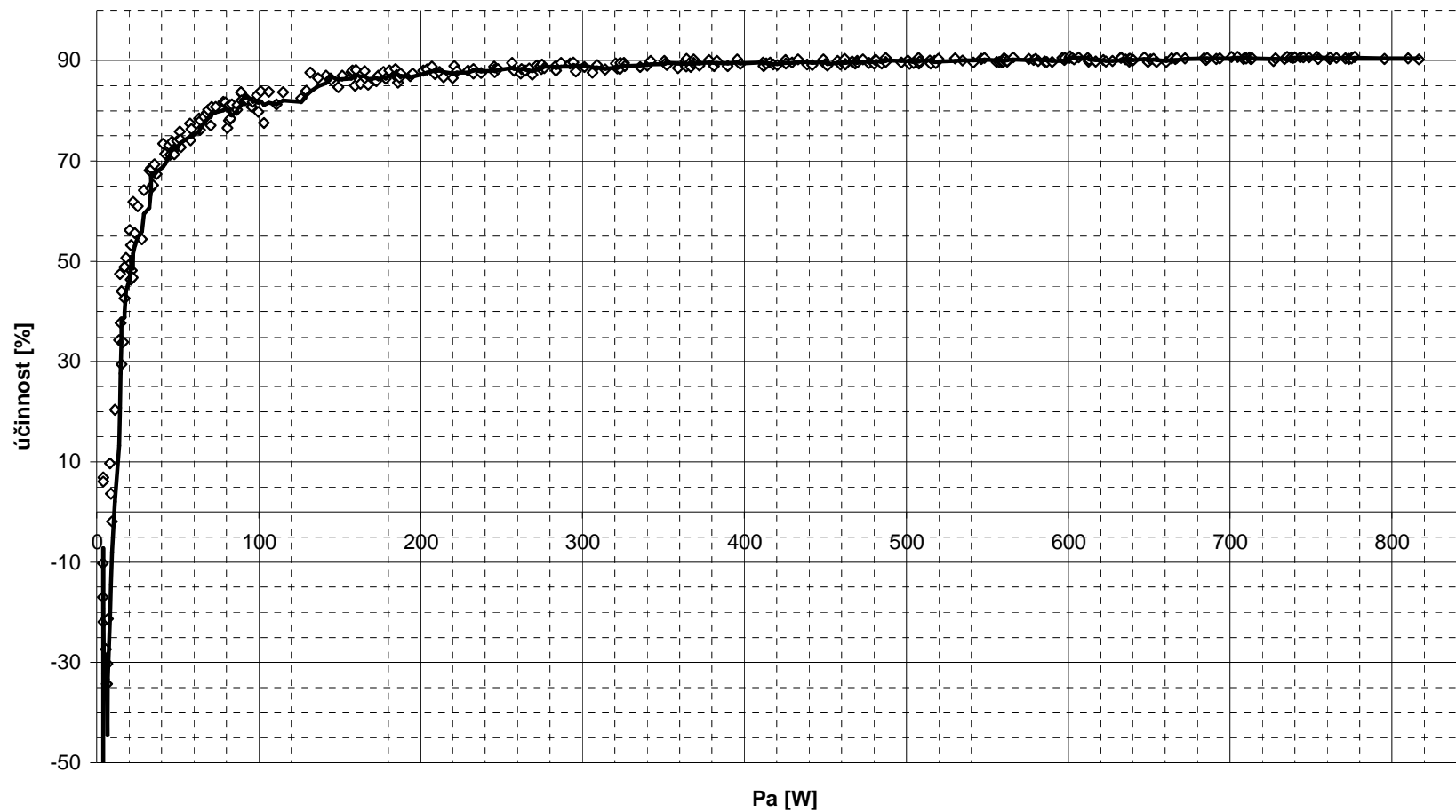
Graf 1 – Účinnost měniče – rozběh

Výkon za měničem - rozběh



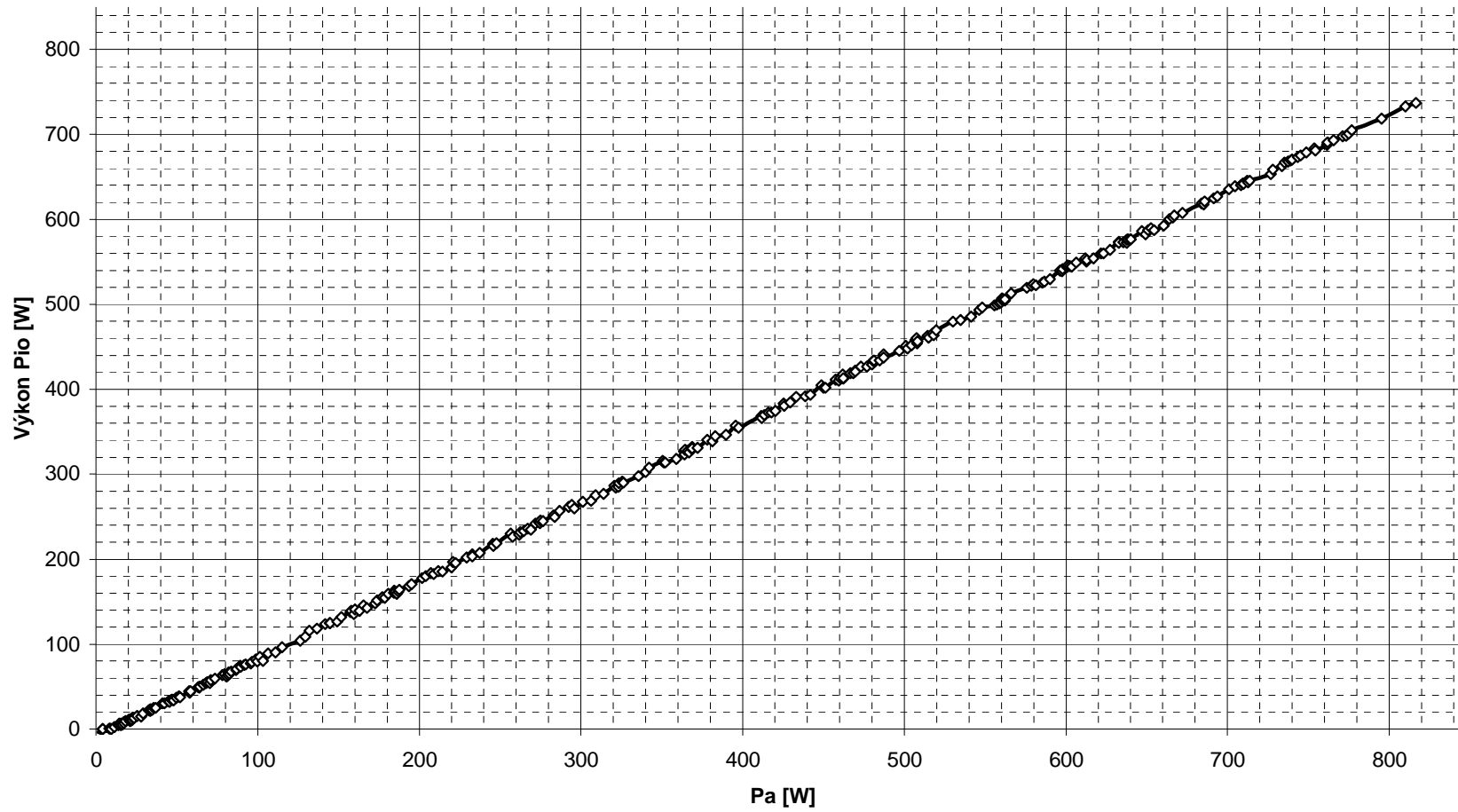
Graf 2 – Výkon za měničem - rozběh

Účinnost měniče



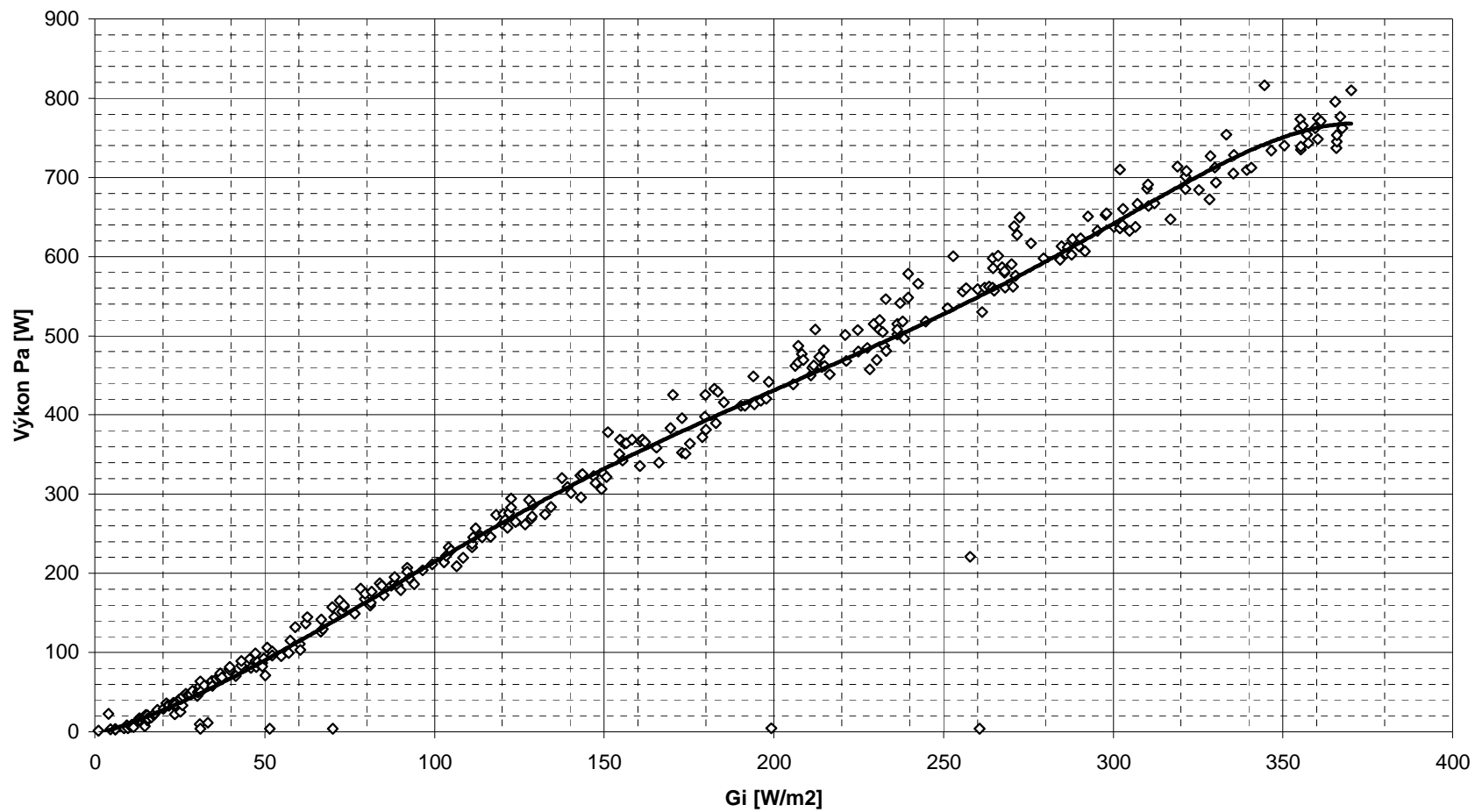
Graf 3 – Účinnost měniče

Výkon za měničem

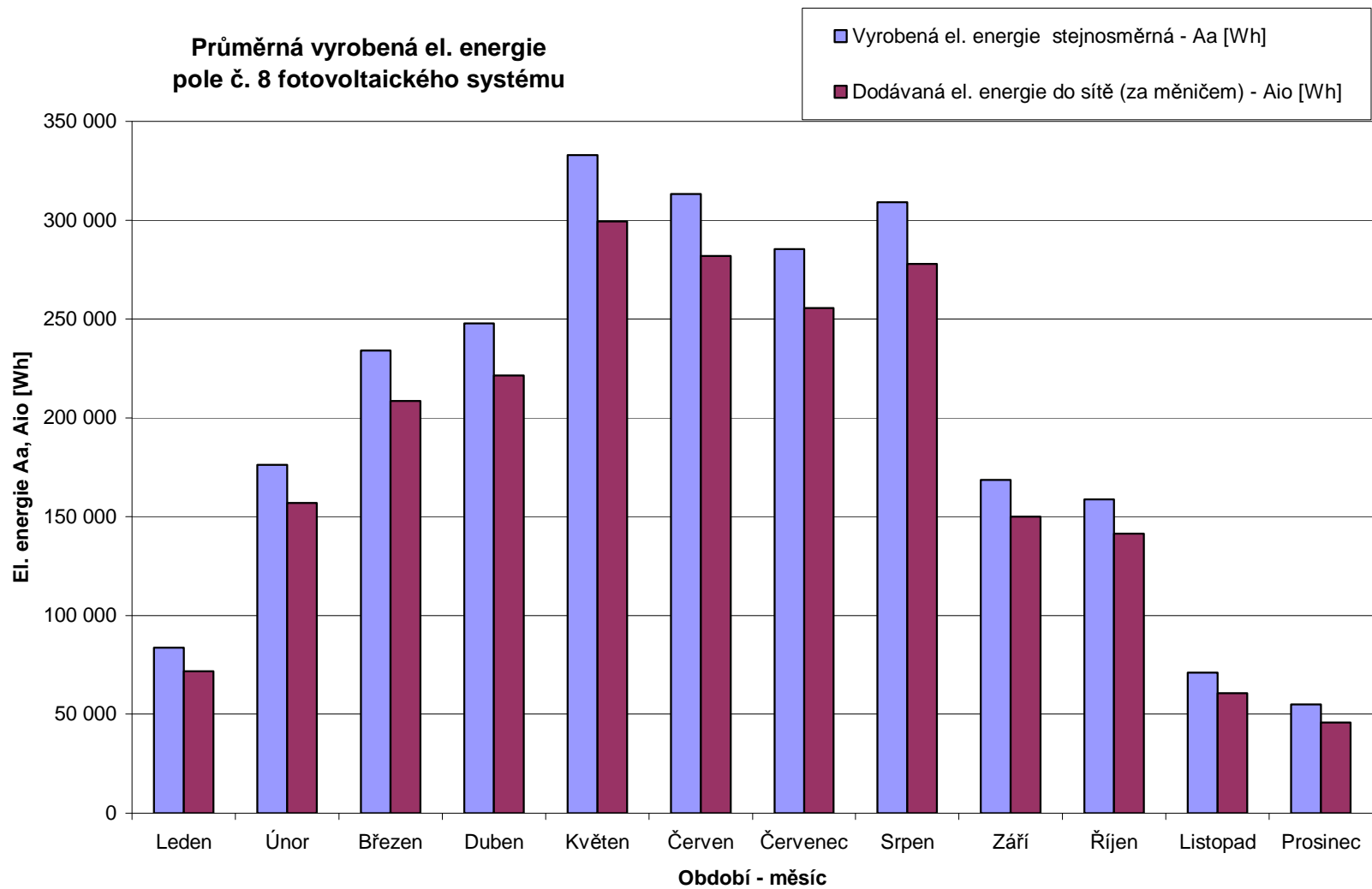


Graf 4 – Výkon za měničem

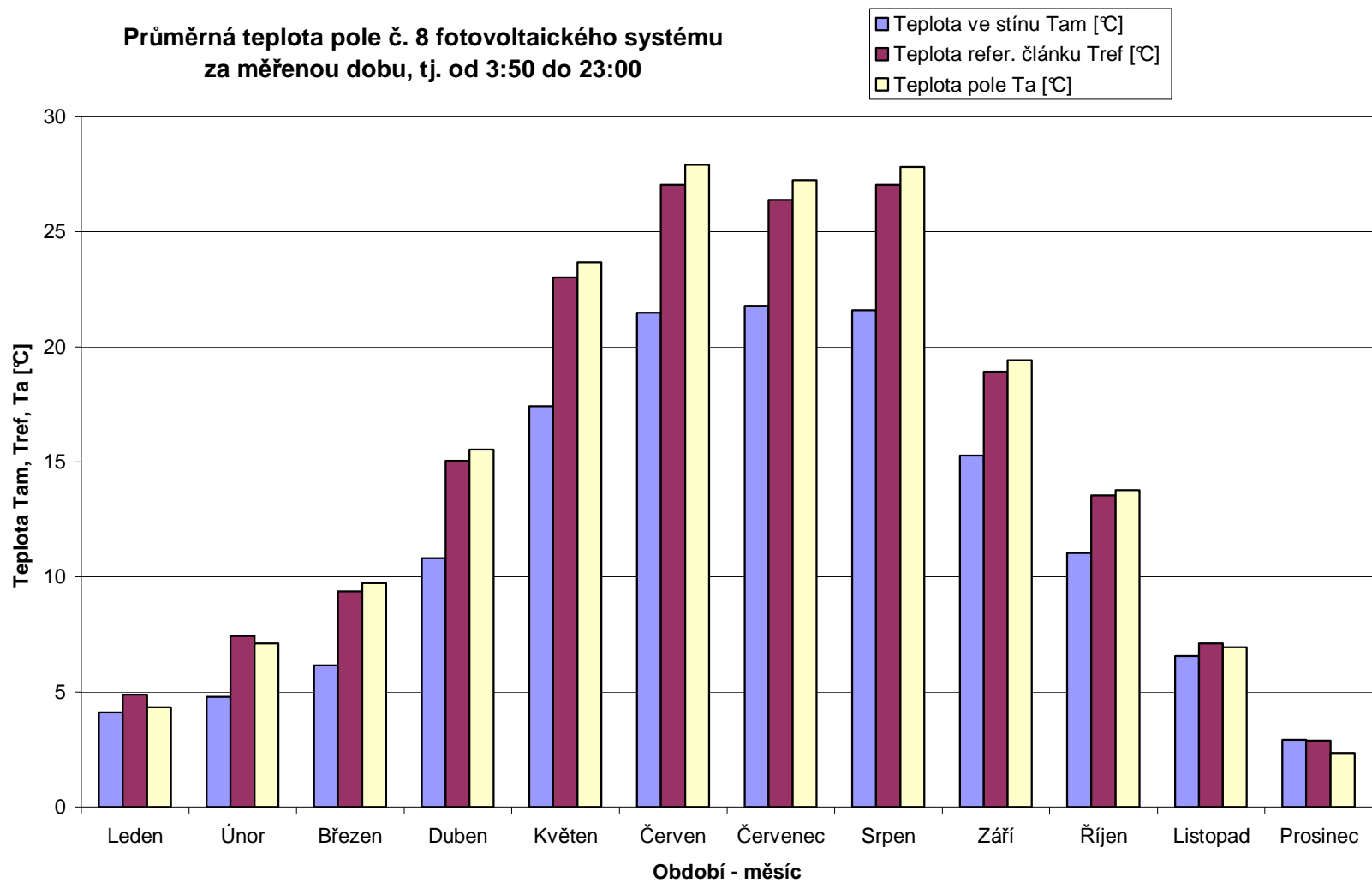
Závislost výkonu na osvitu



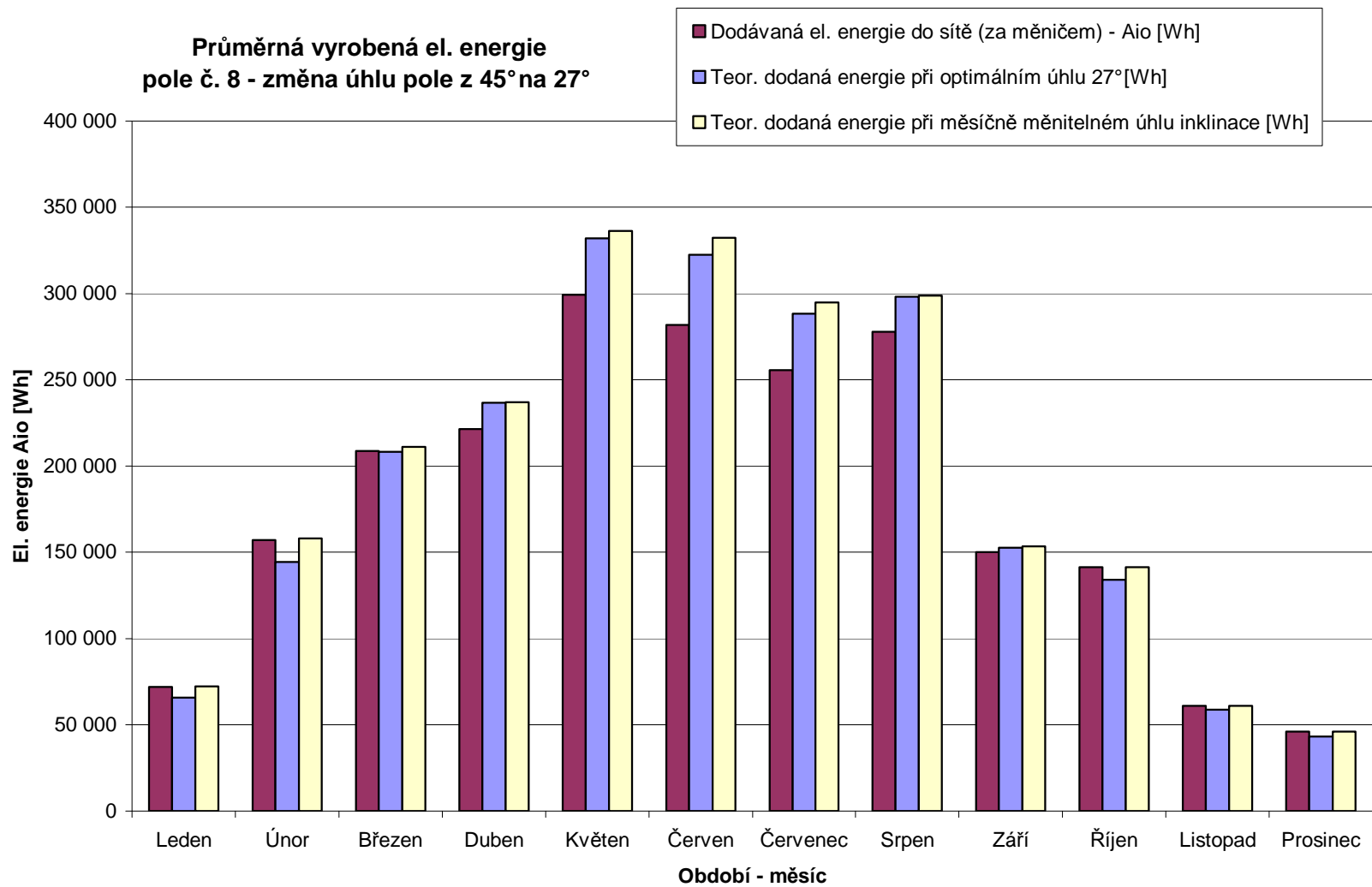
Graf 5 – Závislost výkonu na osvitu



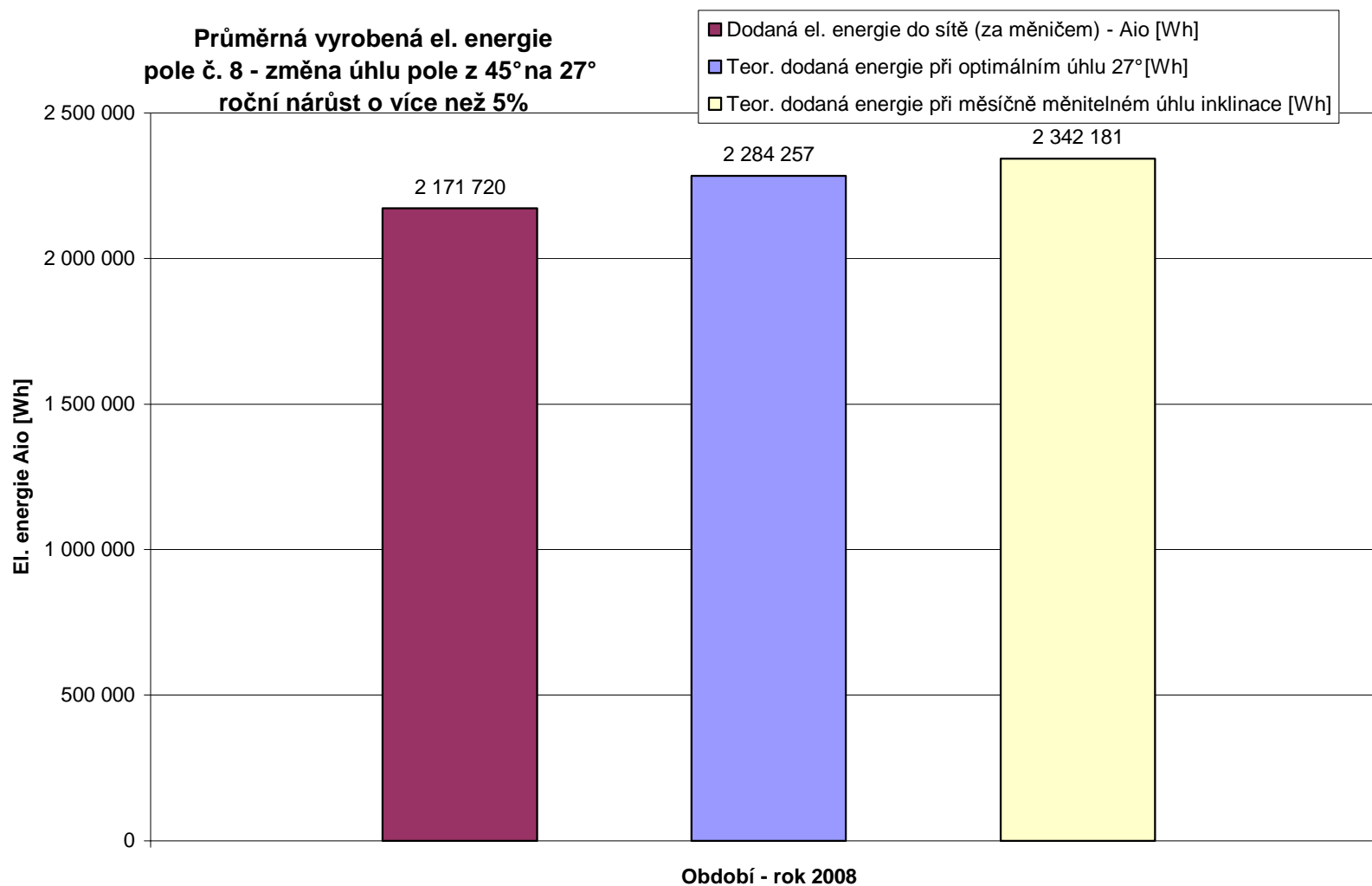
Graf 6 – Průměrná vyrobená el. energie pole č. 8 20kWp FV systému



Graf 7 – Průměrná teplota pole č.8 20kWp FV systému

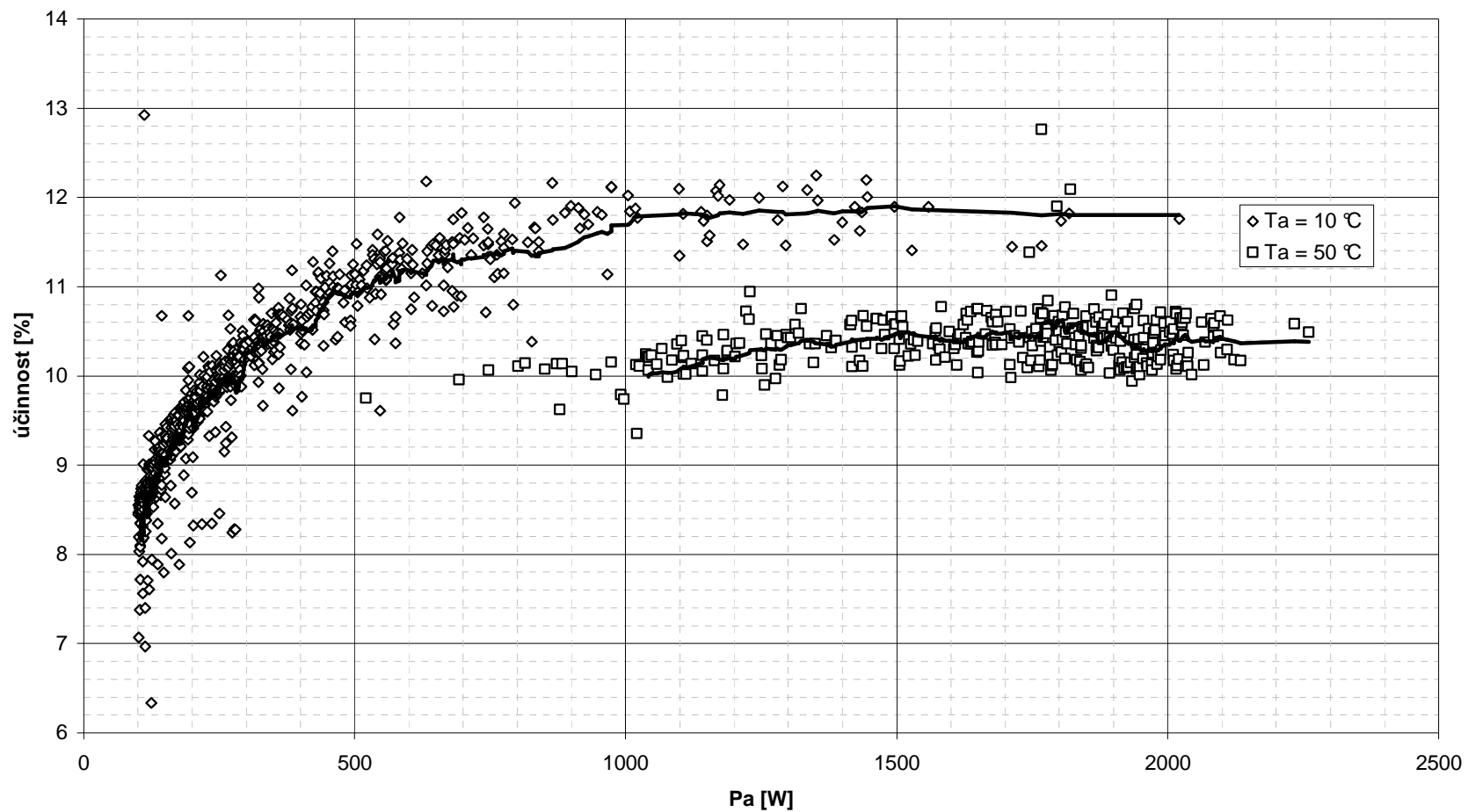


Graf 8 – Průměrná vyrobená el. energie pole č. 8 – změna úhlu z 45° na 27°



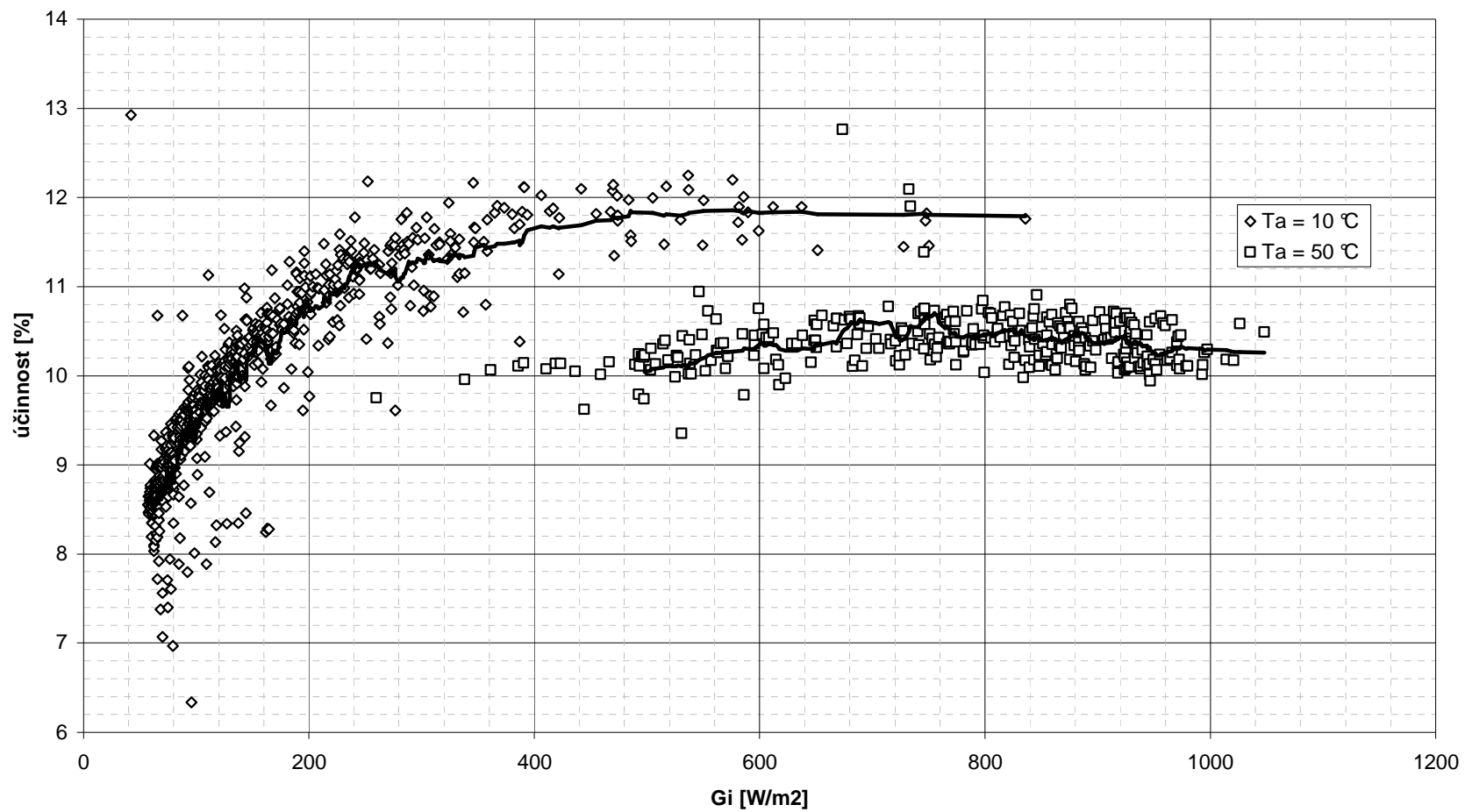
Graf 9 – Průměrná vyrobená el. energie pole č. 8 – změna úhlu pole z 45° na 27°. Roční nárůst o více než 5 %.

Účinnost pole č. 8 fotovoltaického systému



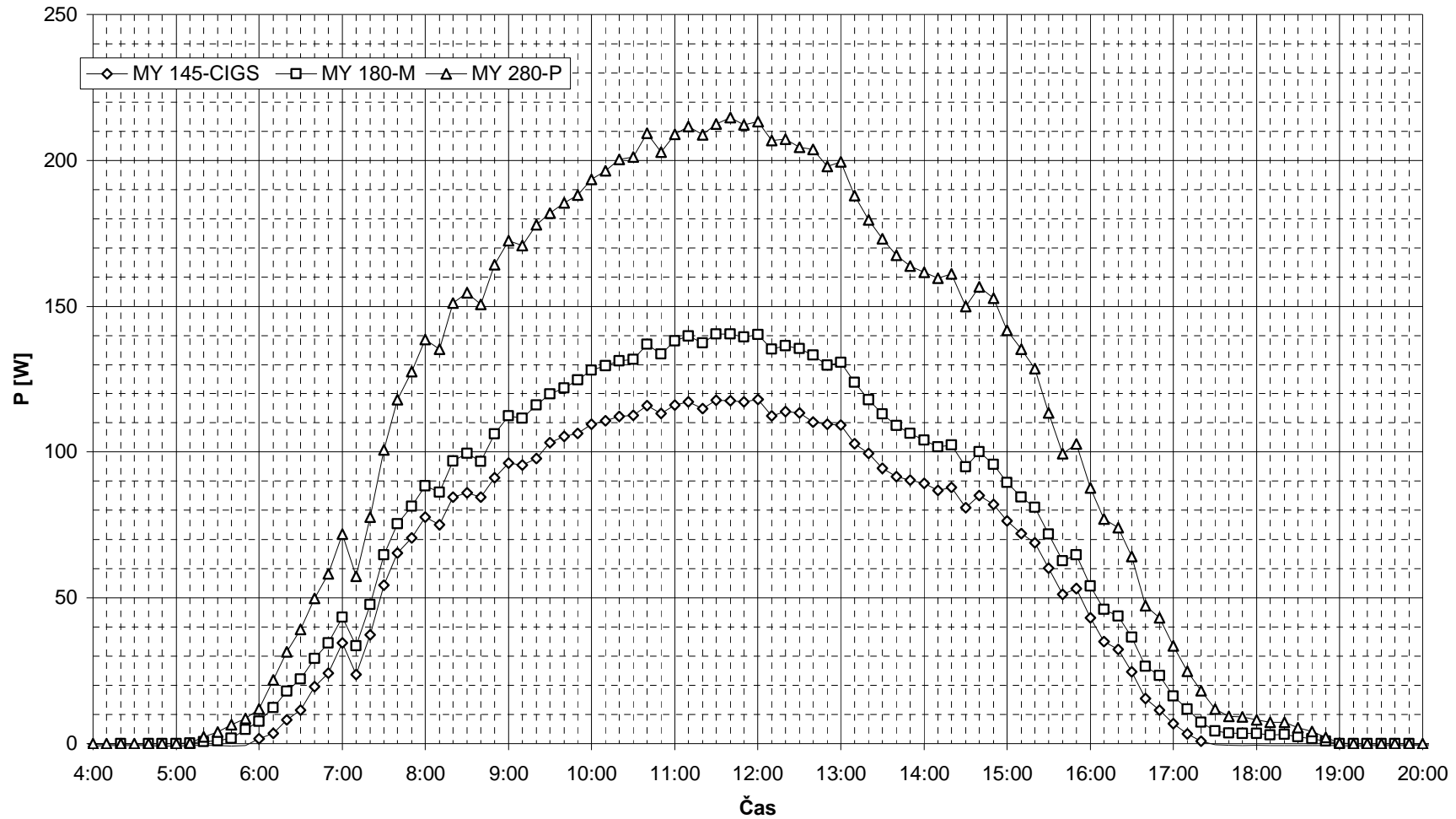
Graf 10 – Účinnost pole č. 8 20kWp FV systému – závislost na Pa

Účinnost pole č. 8 fotovoltaického systému



Graf 11 – Účinnost pole č. 8 20kWp FV systému – závislost na Gi

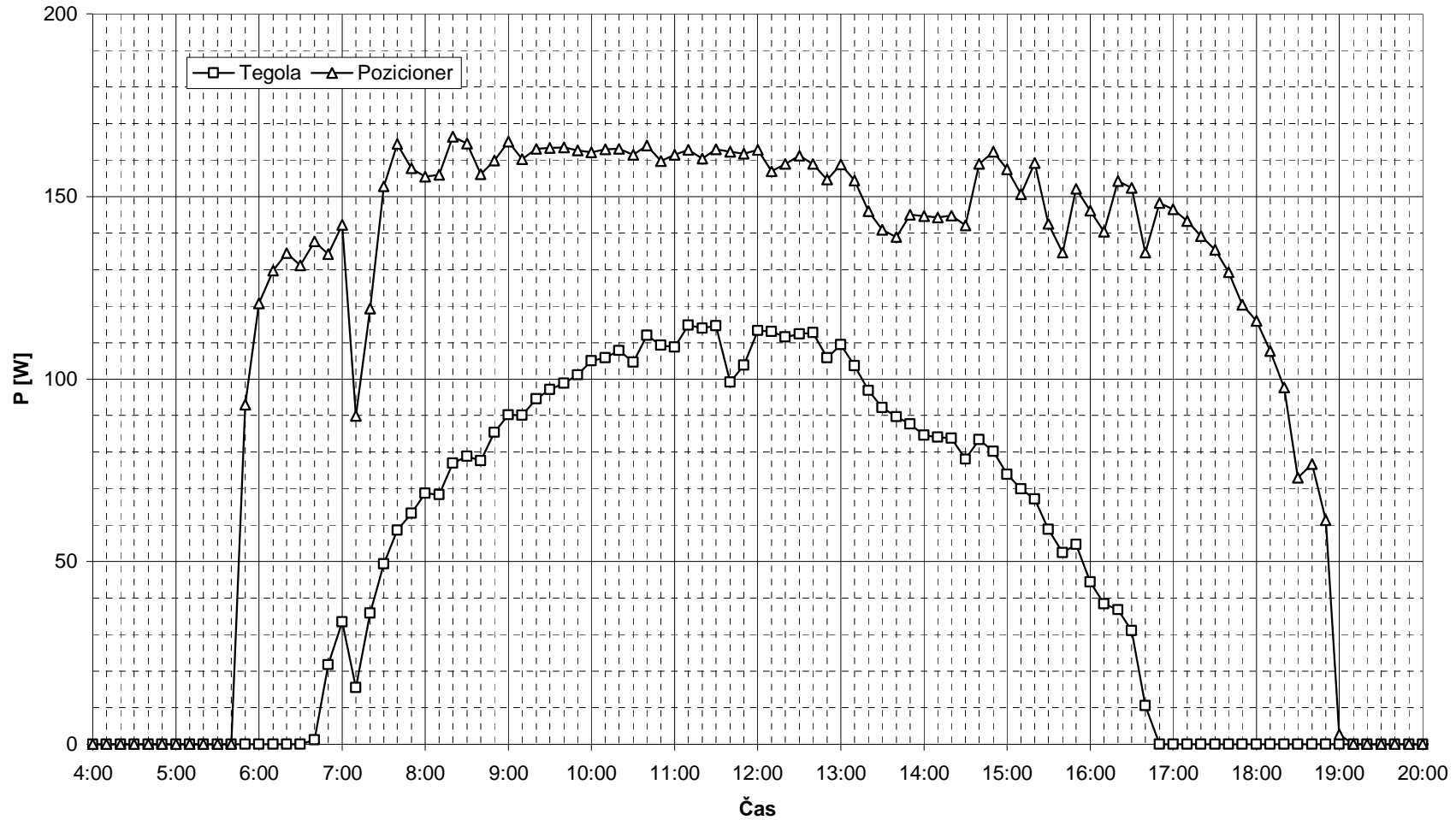
Tři panely - průběh výkonu o slunečném dnu



Graf

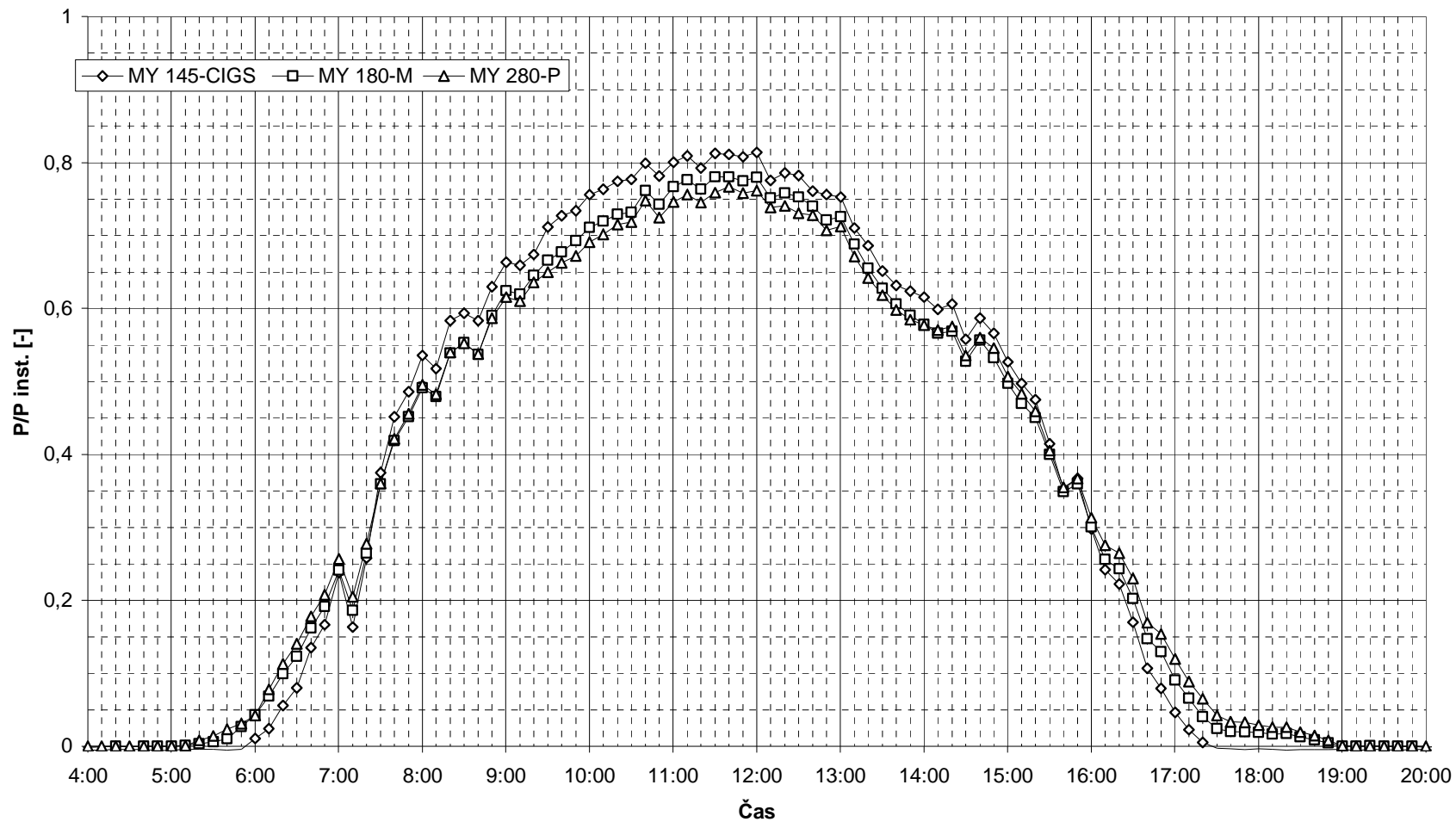
Graf 12 - Tři panely - průběh výkonu o slunečném dnu

Tegola a pozicioner - průběh výkonu o slunečném dnu



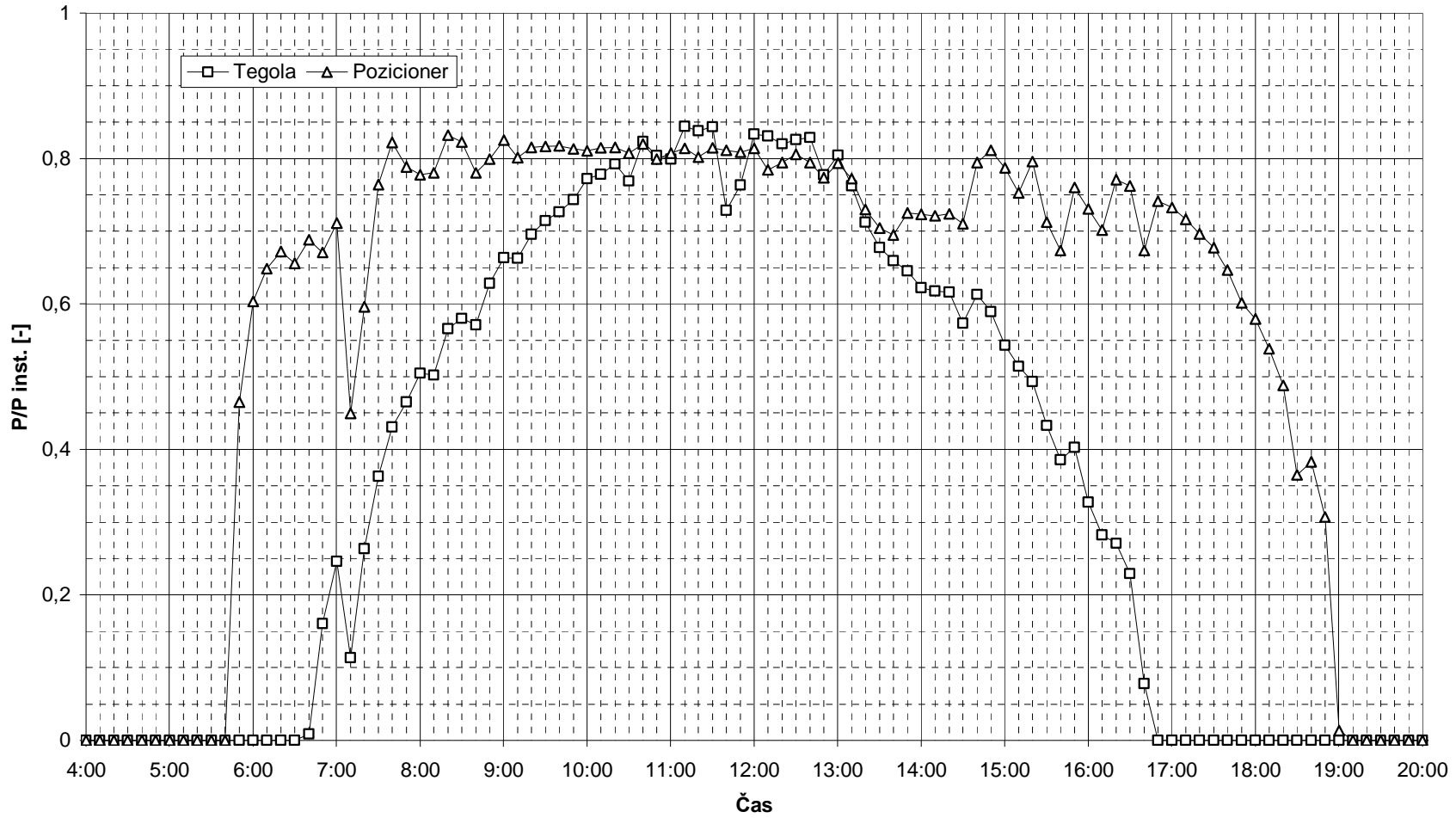
Graf 13 - Tegola a pozicioner - průběh výkonu o slunečném dnu

Tři panely - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočten na instalovaný výkon



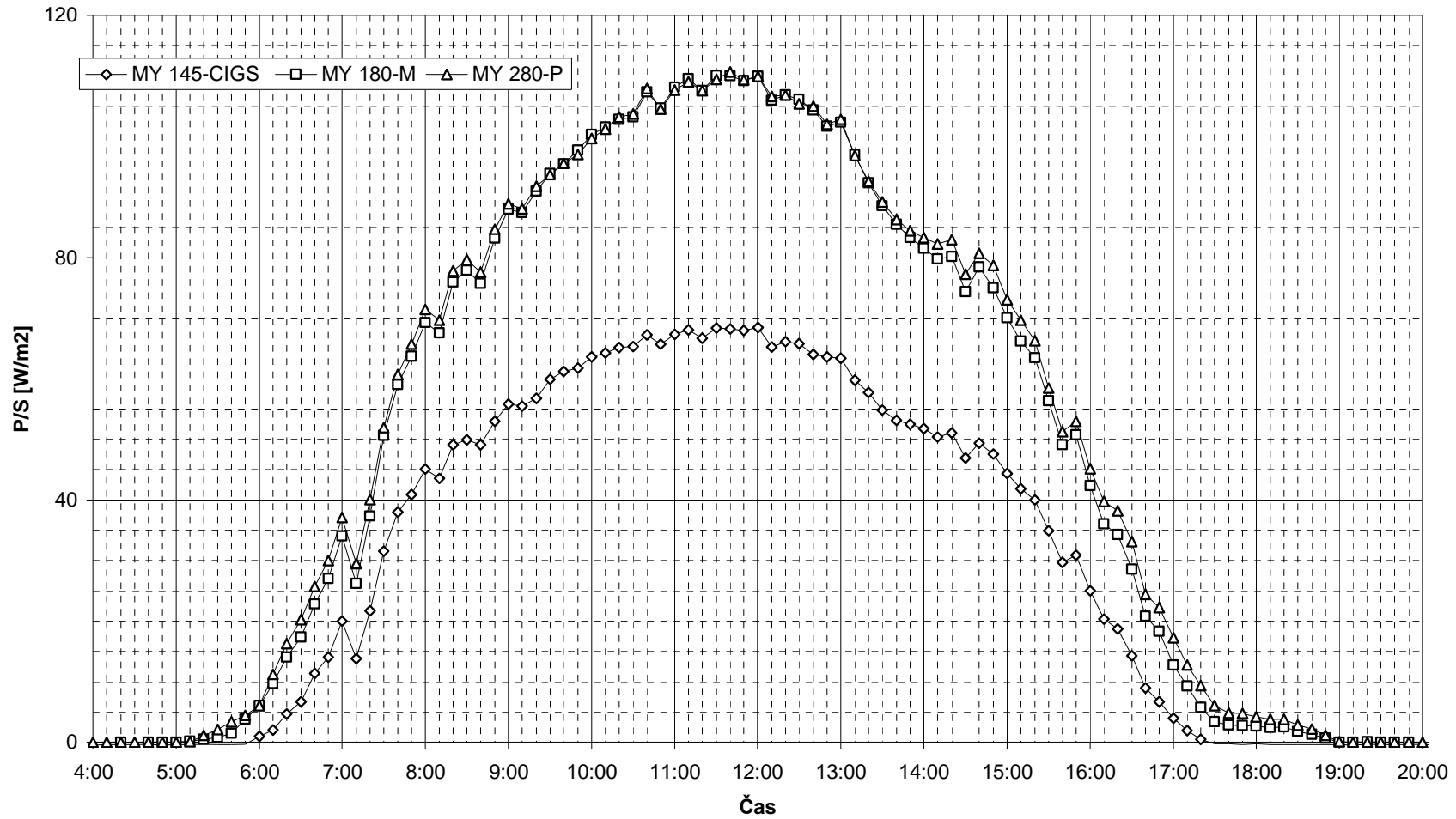
Graf 14 - Tři panely - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočten na inst. výkon

Tegola a pozicioner - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočten na instalovaný výkon



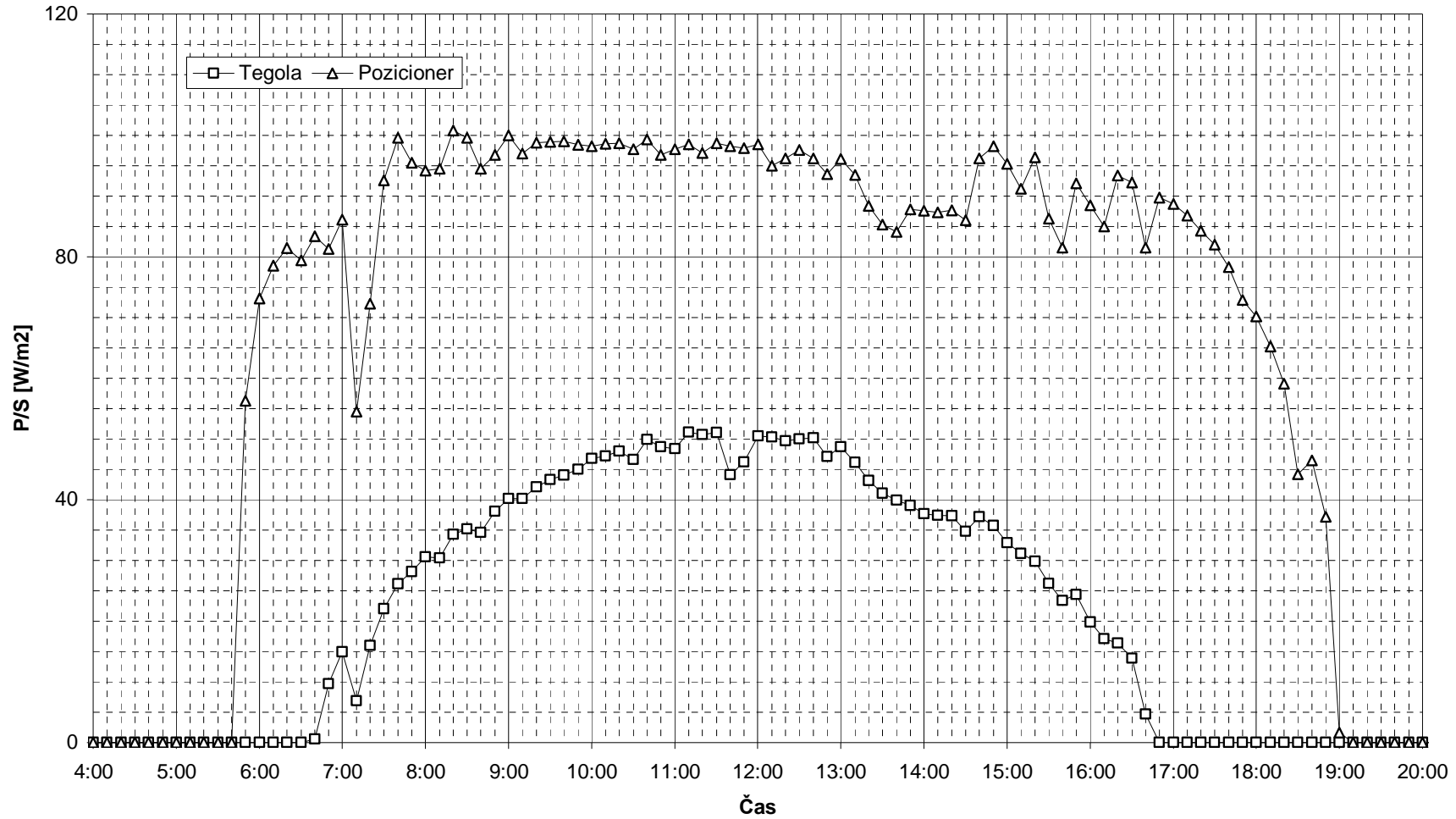
Graf 15 - Tegola a poz. - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočten na inst. výkon

Tři panely - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočten na čtverečný metr



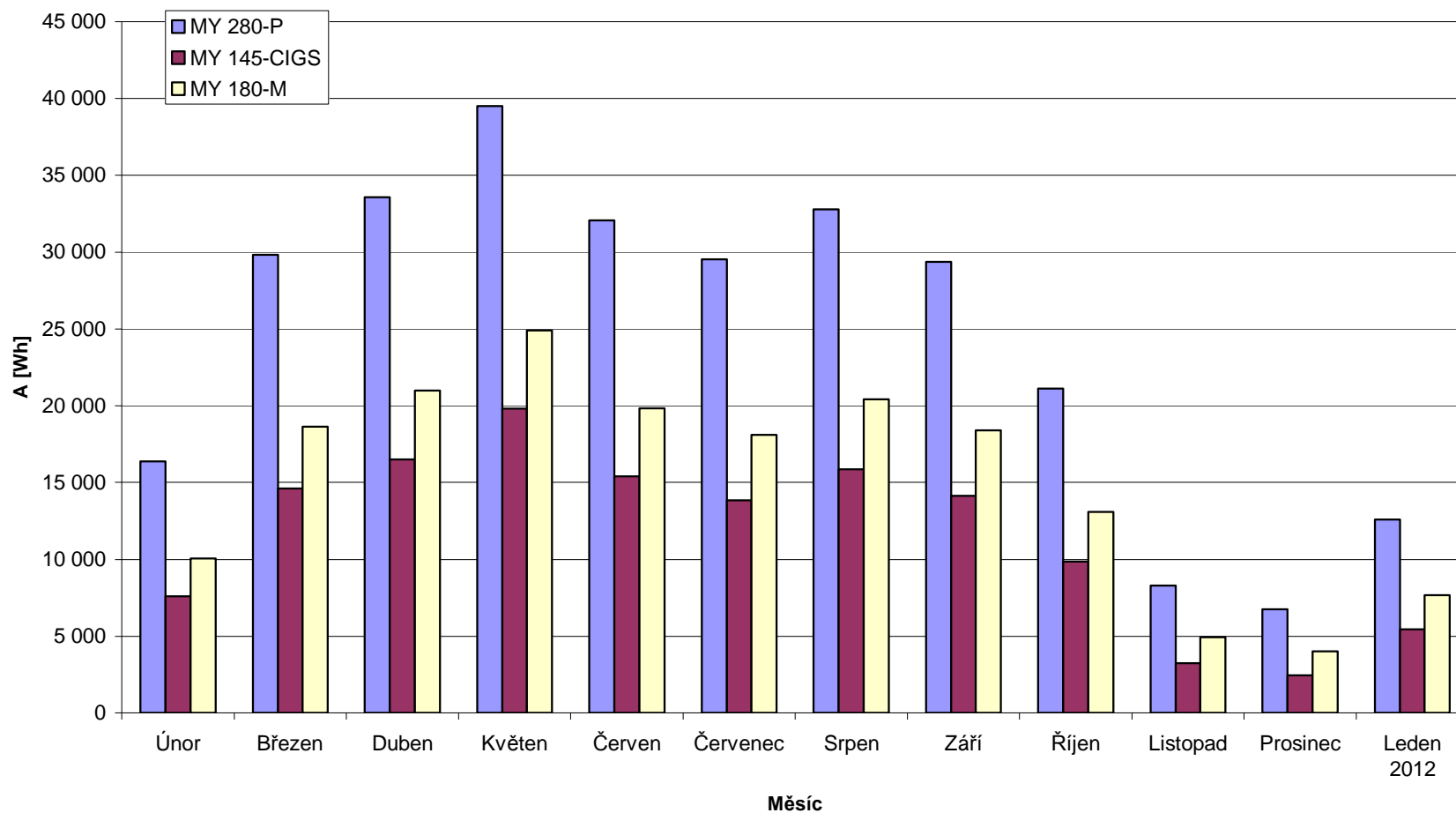
Graf 16 - Tři panely - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočten na m²

Tegola a pozicioner - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočten na čtverečný metr



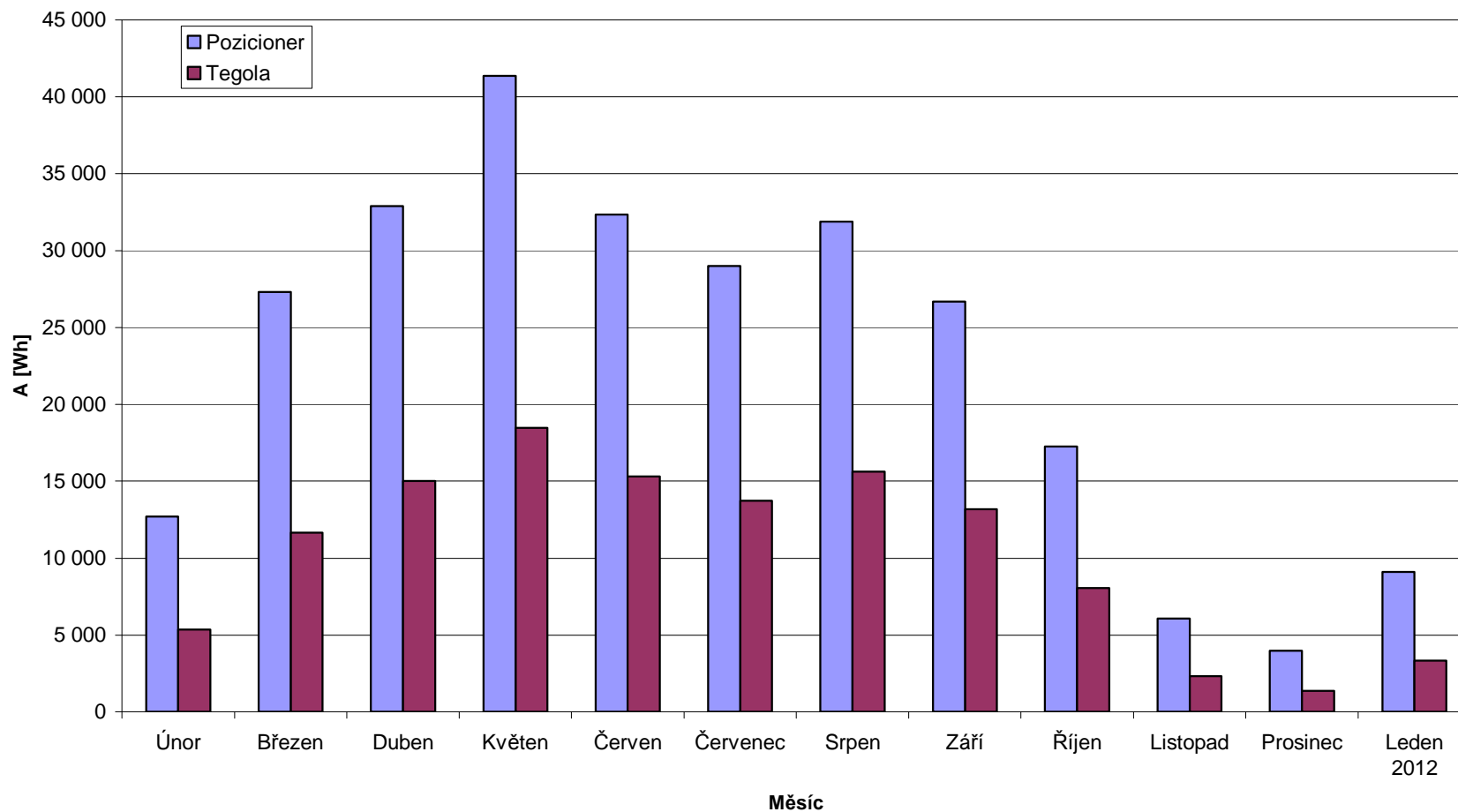
Graf 17 - Tegola a poz. - průběh výkonu o slunečném dnu, přepočten na m²

Tři panely - měsíční vyrobená el. energie Únor 2011 až Leden 2012



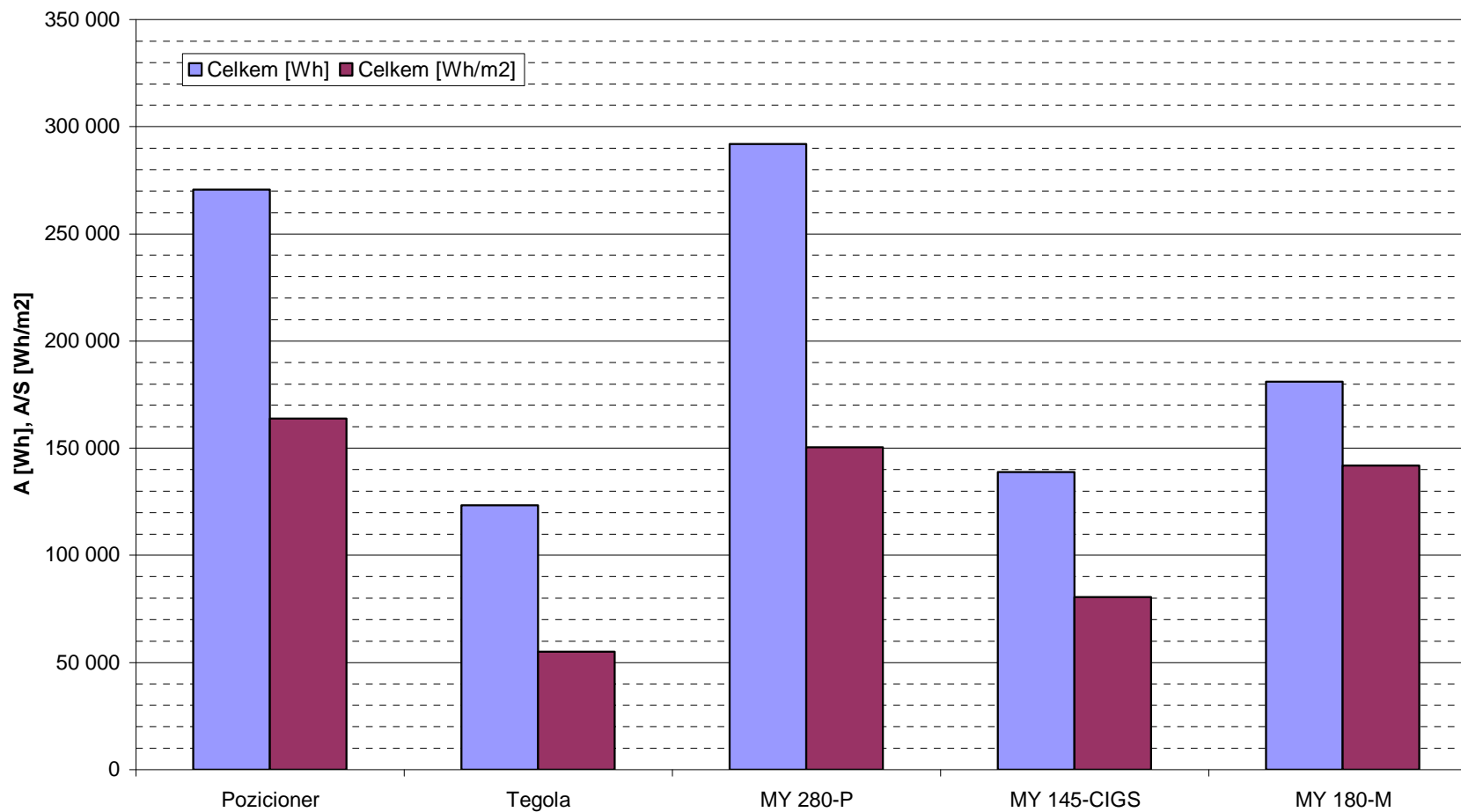
Graf 18 - Tři panely - měsíční vyrobená el. energie Únor 2011 až Leden 2012

Tegola a pozicioner - měsíční vyrobená el. energie Únor 2011 až Leden 2012



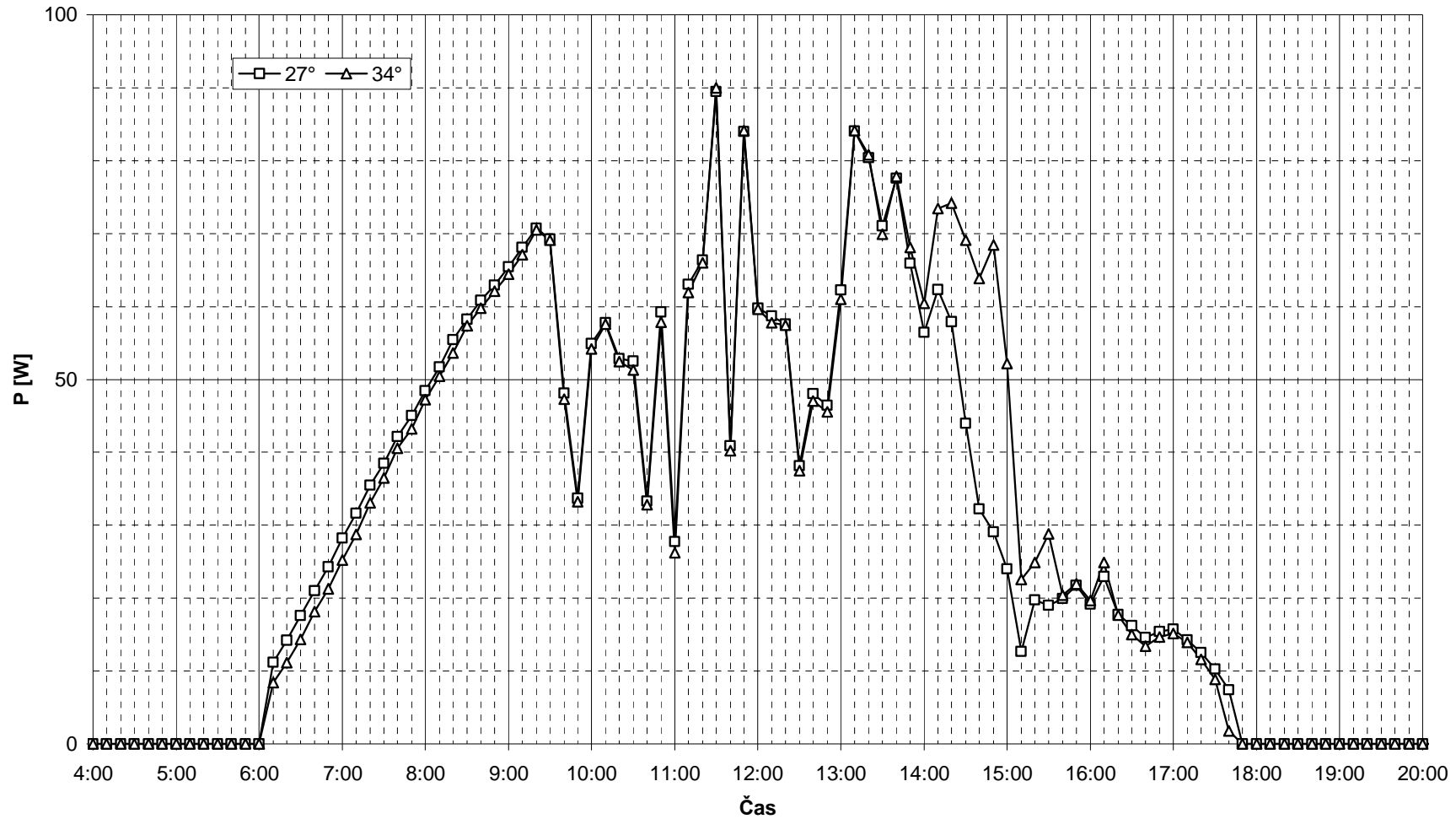
Graf 19 - Tegola a poz. - měsíční vyrobená el. energie Únor 2011 až Leden 2012

Tegola, pozicioner, tři panely - celková roční vyrobená energie



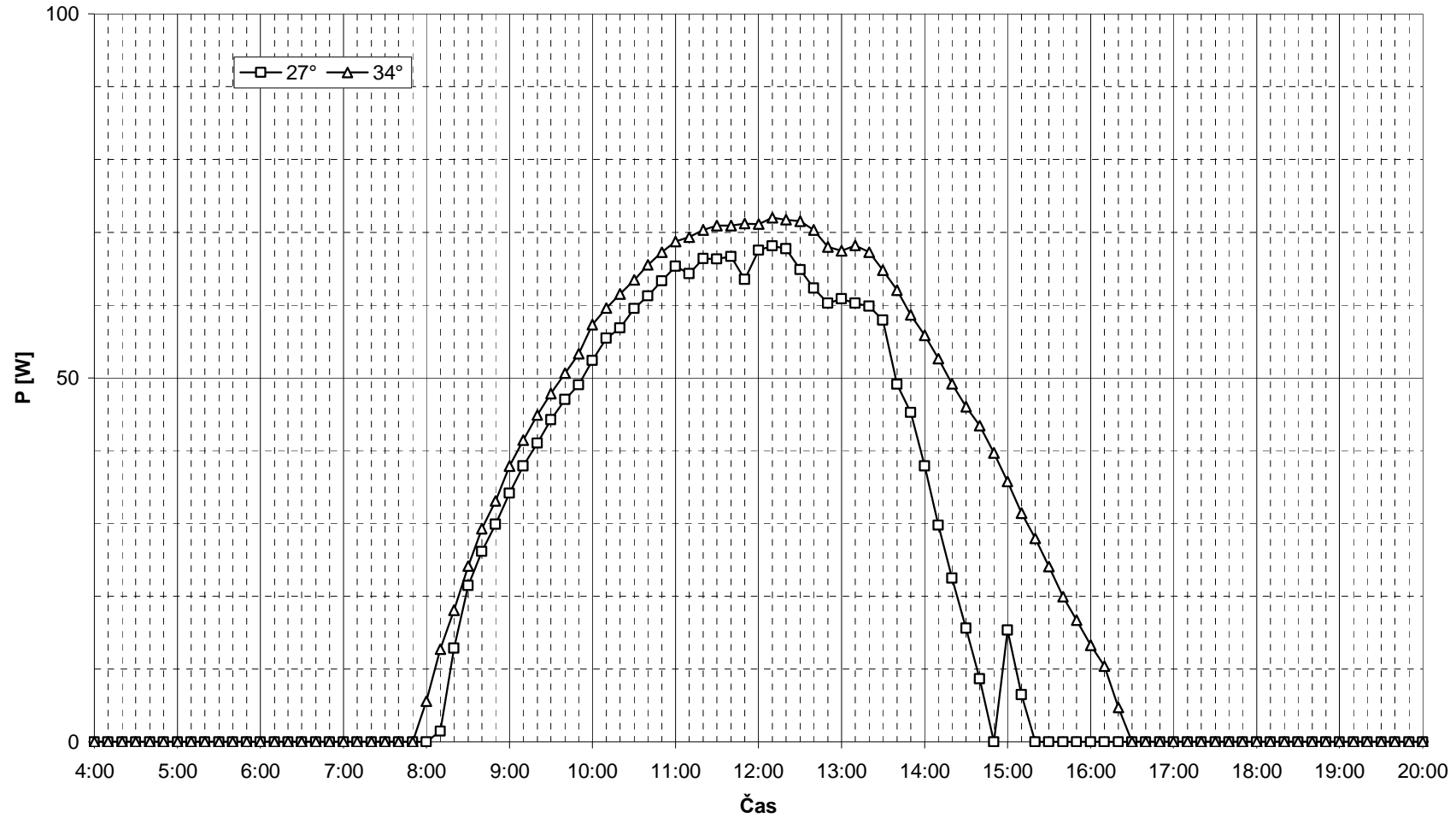
Graf 20 – Tegola, pozicioner, tři panely - celková roční vyrobená energie

Dva úhly - průběh výkonu o letním dnu



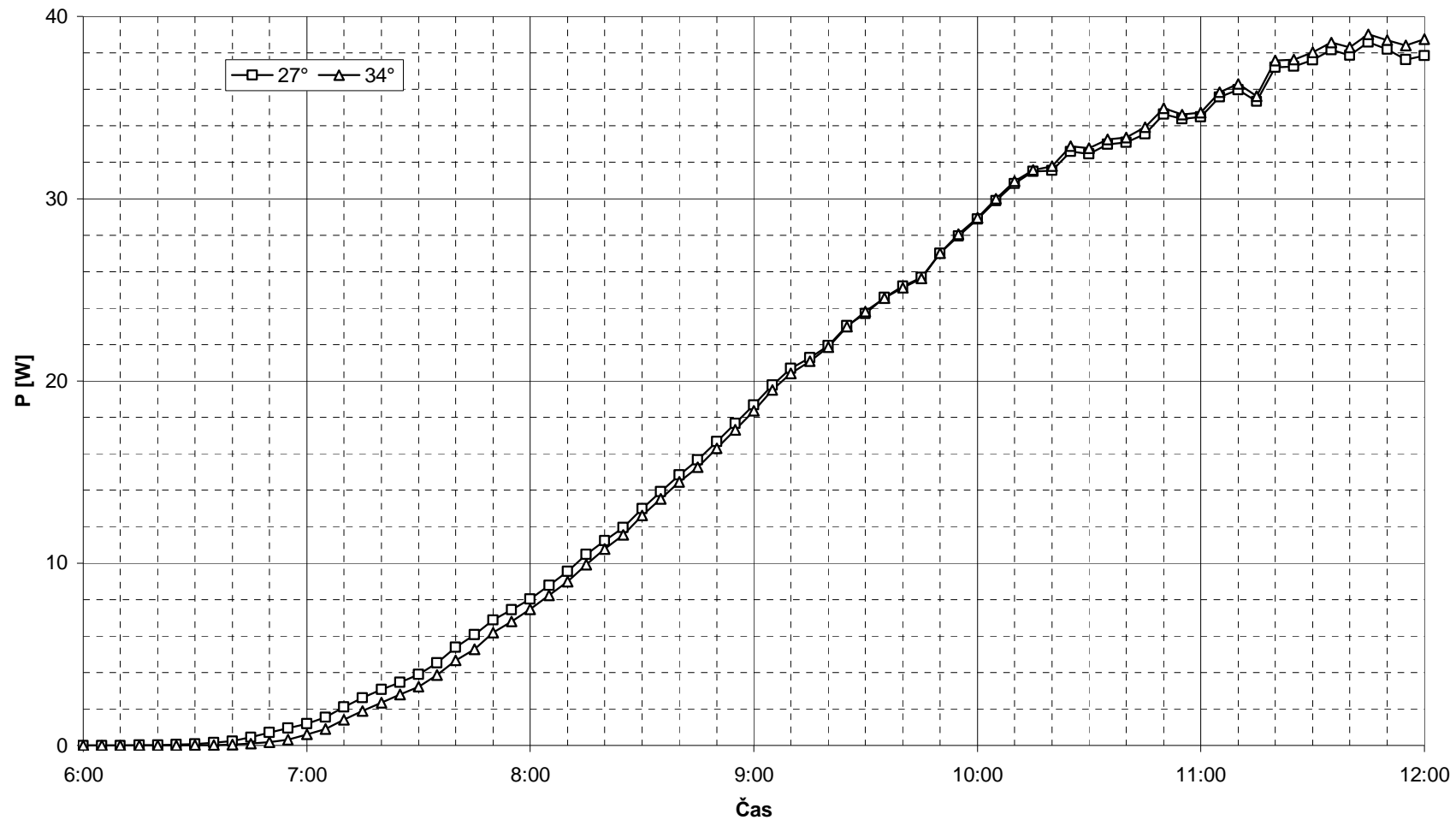
Graf 21 - Dva úhly - průběh výkonu o letním dnu

Dva úhly - průběh výkonu o zimním dnu



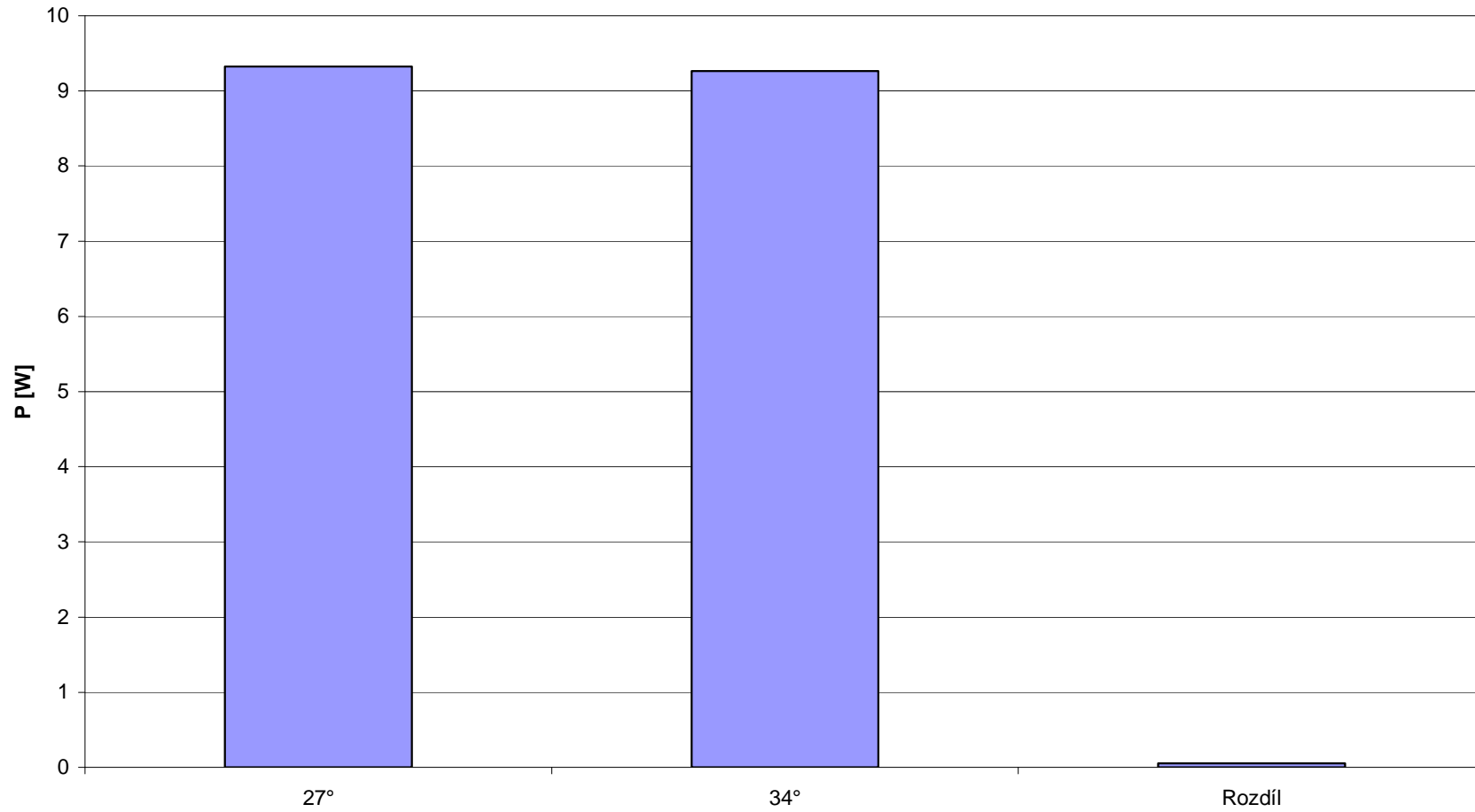
Graf 22 - Dva úhly - průběh výkonu o zimním dnu

Dva úhly - průběh průměrného výkonu 6-12 h



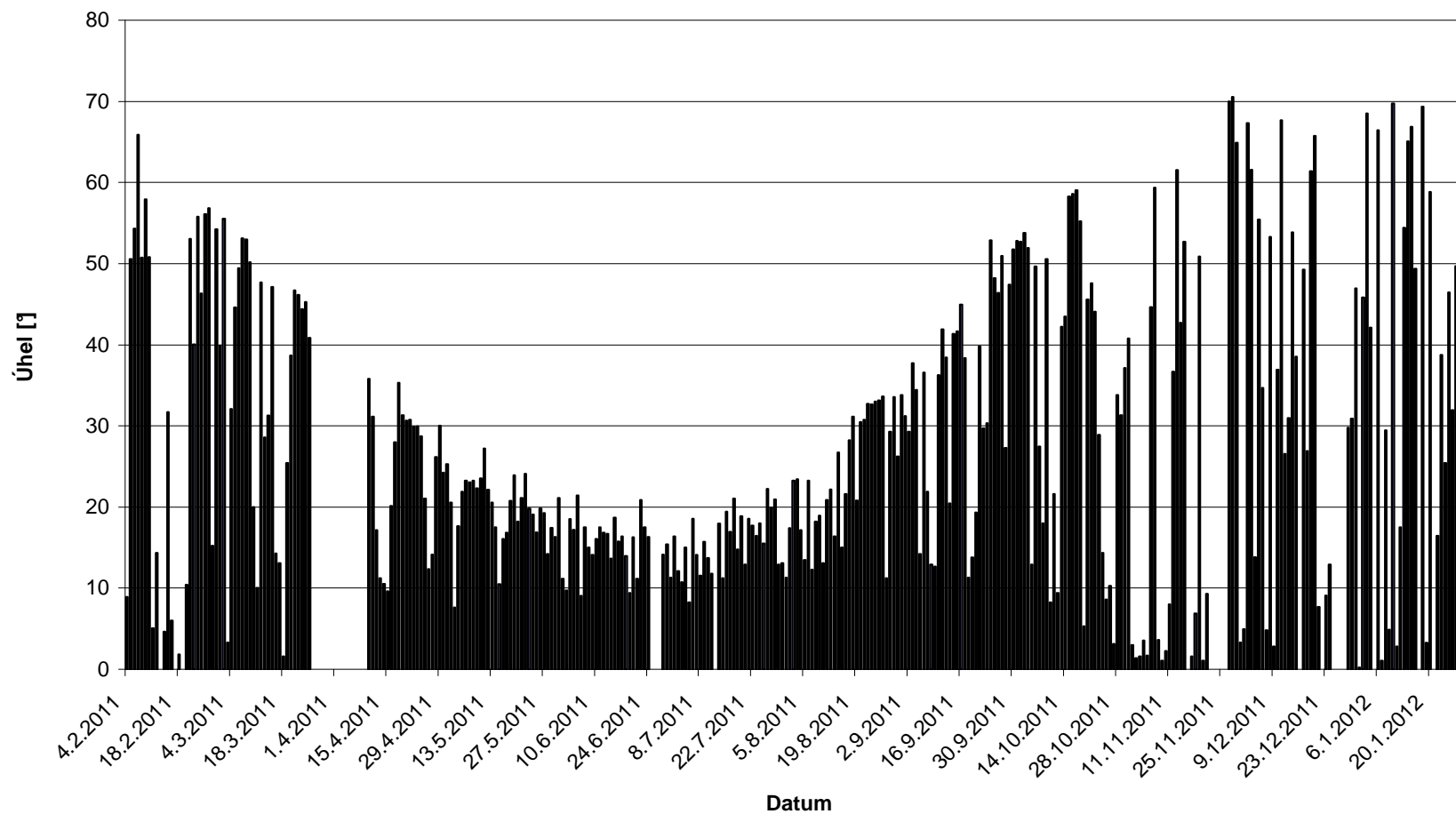
Graf 23 - Dva úhly - průběh průměrného výkonu 6-12 h

Dva úhly - průměrné výkony 0 - 12 h



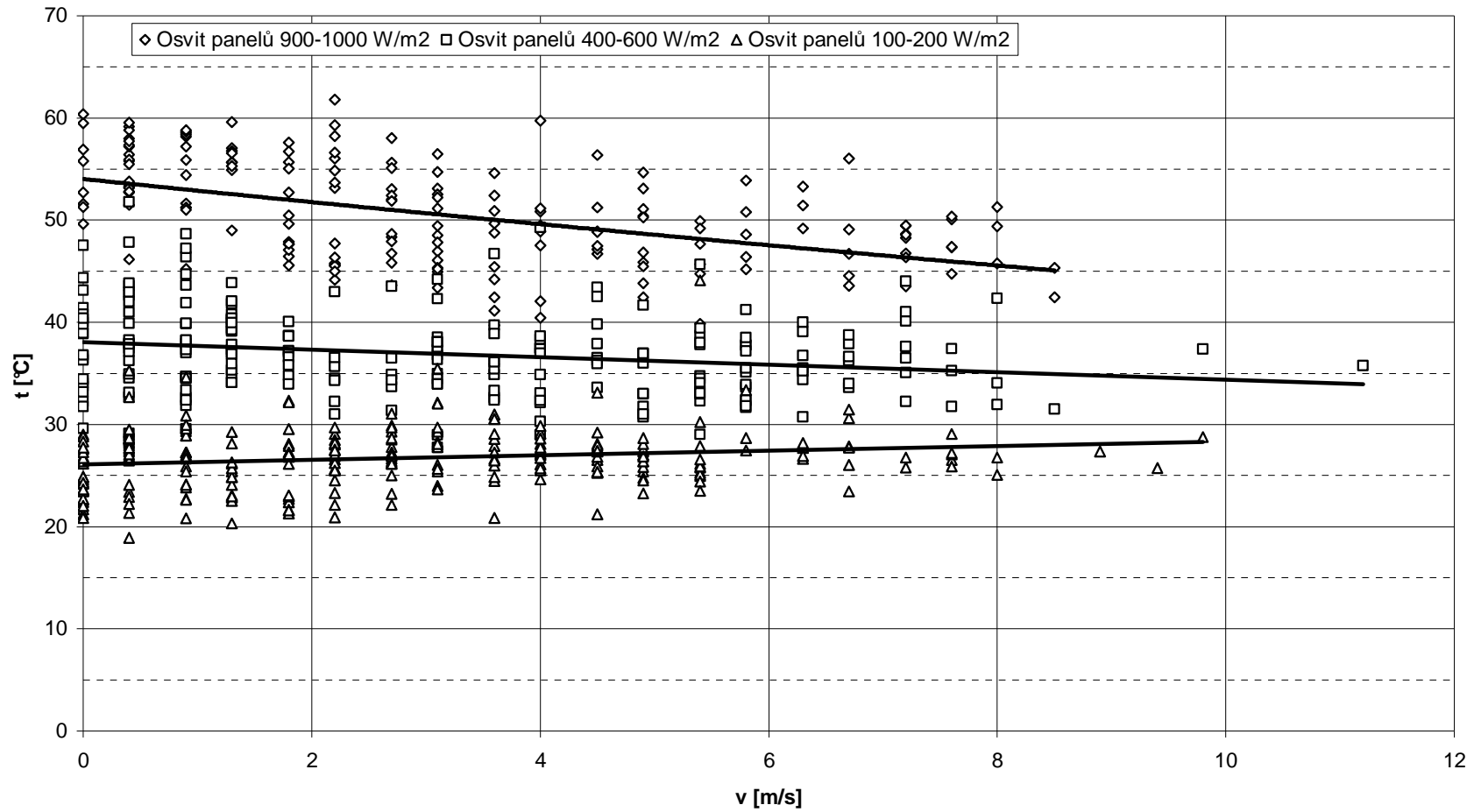
Graf 24 - Dva úhly – průměrné výkony 0 -12 h

Denní vážené průměry úhlů dopadajícího slunečního záření



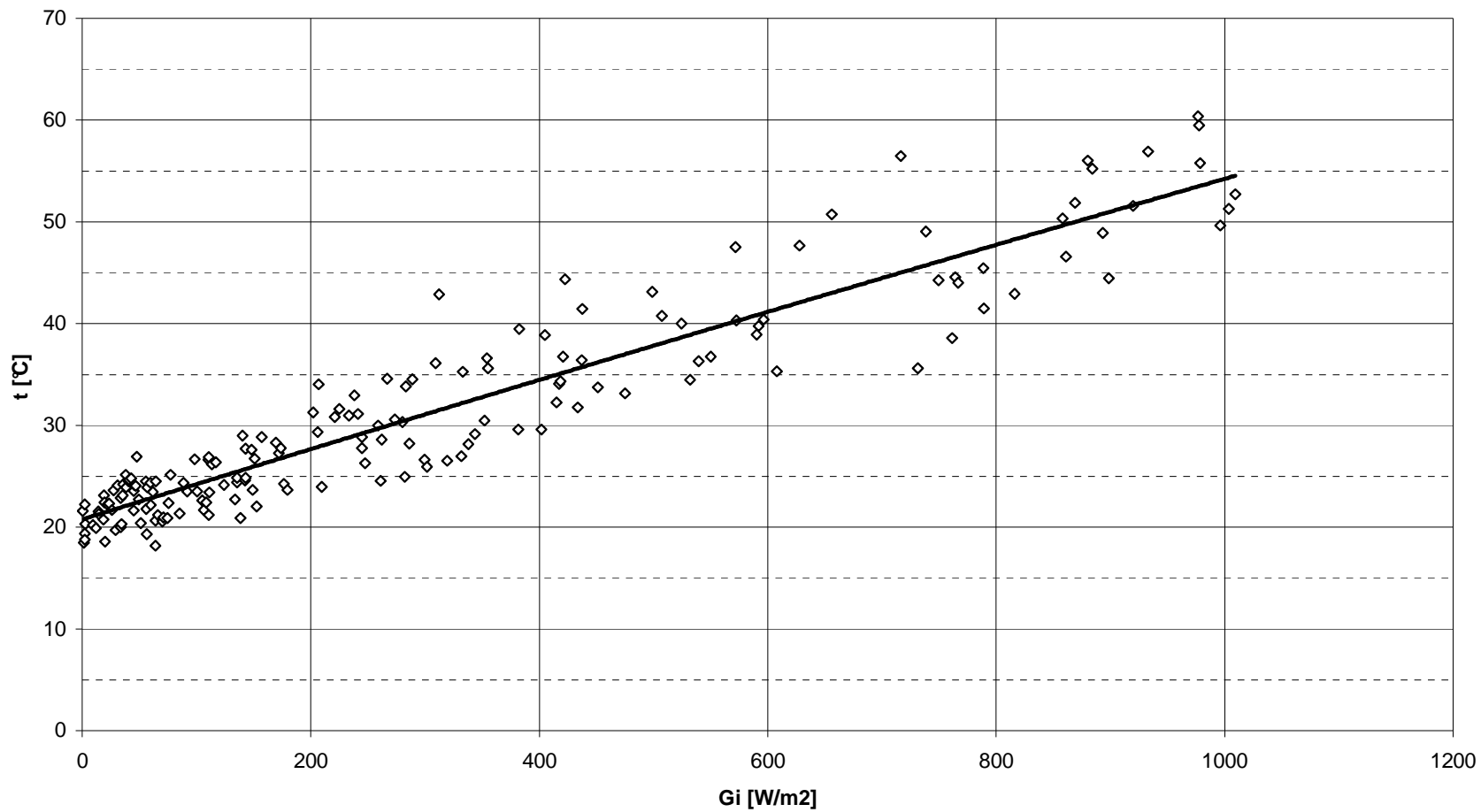
Graf 25 - Denní vážené průměry úhlů dopadajícího slunečního záření

Závislost teploty panelů na rychlosti větru, teplota vzduchu 19-21°C



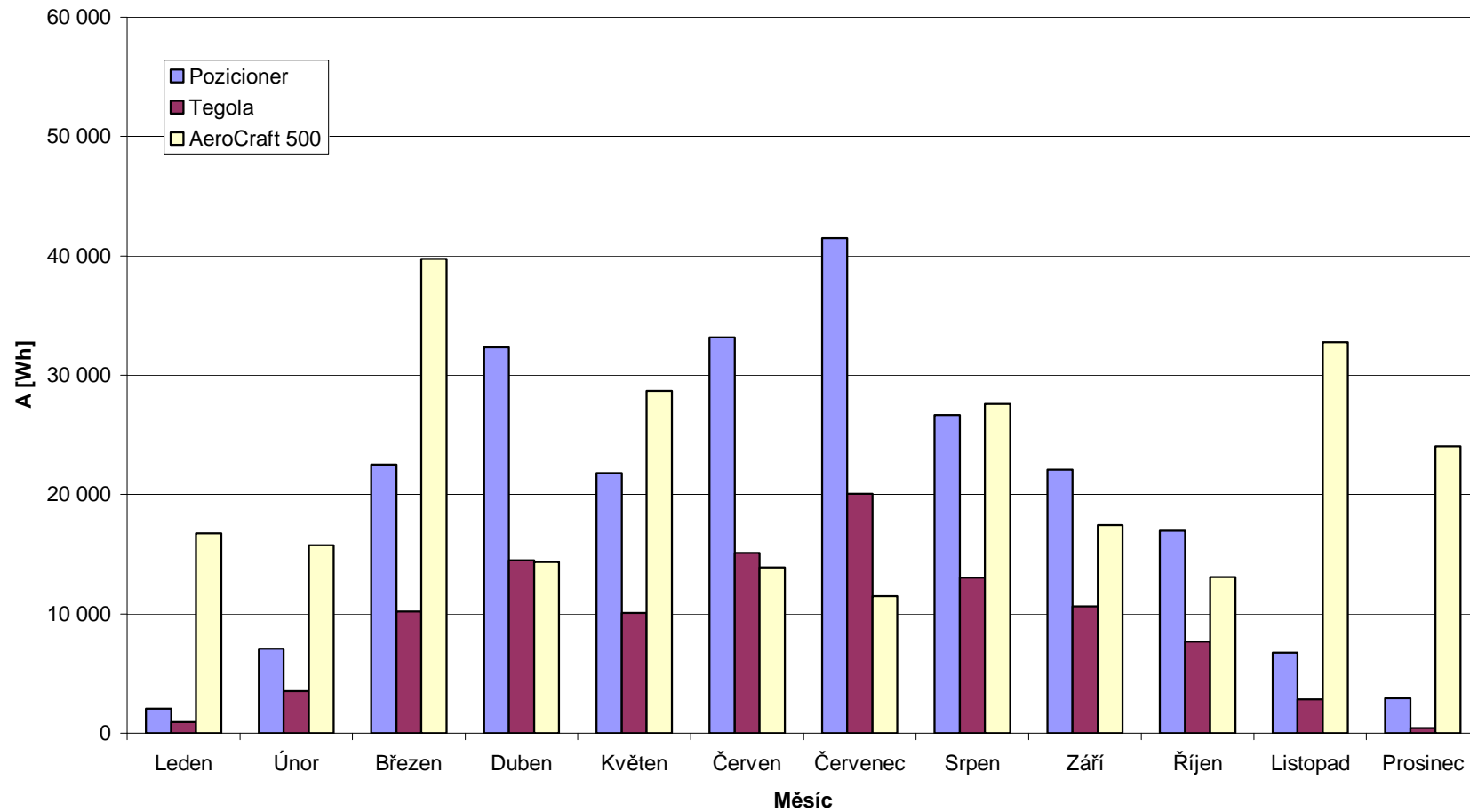
Graf 26 – Závislost teploty panelů na rychlosti větru

Teplota panelů v závislosti na osvětlení, rychlost větru 0 m/s, tepl. ve stínu 19-21 °C



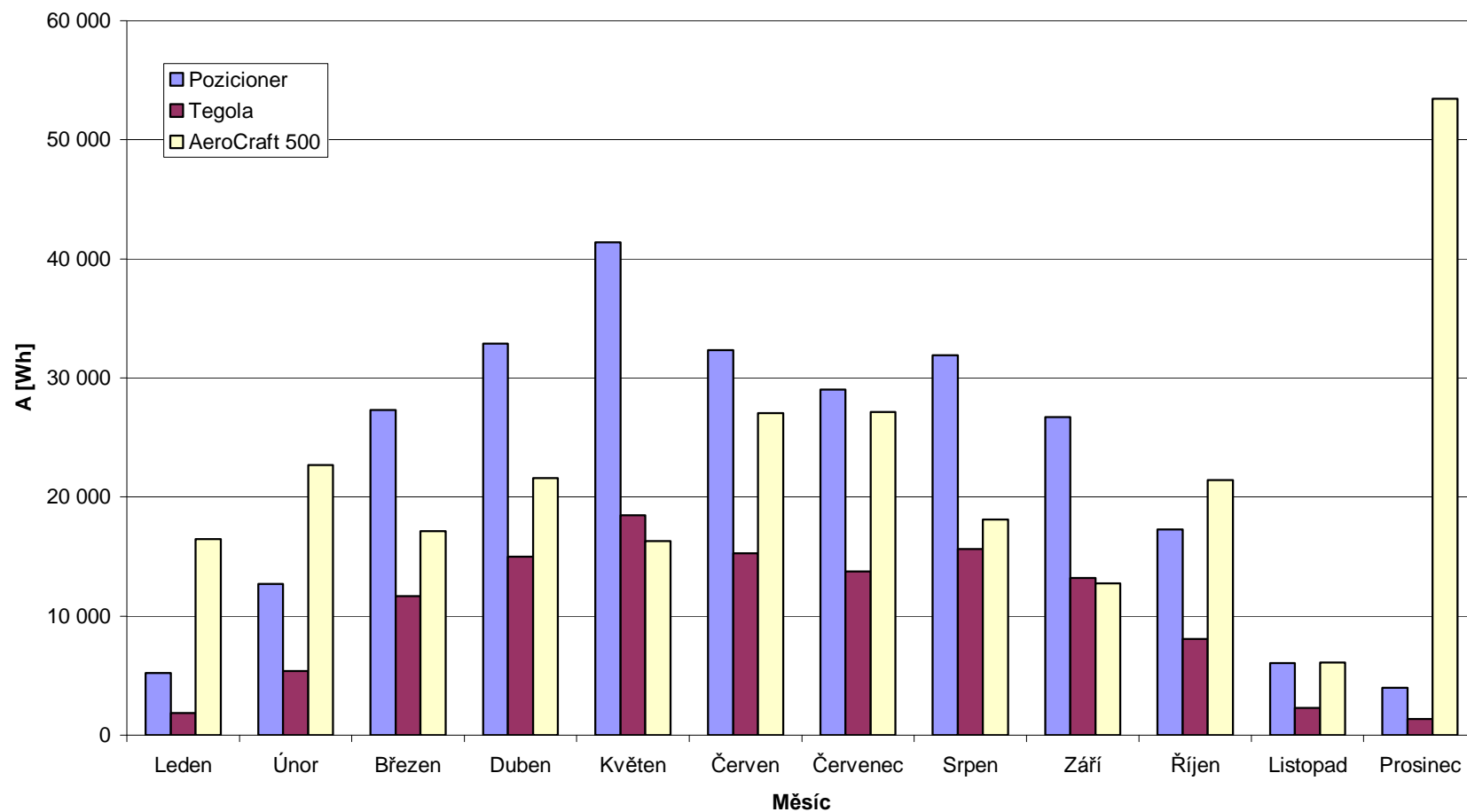
Graf 27 – Teplota panelů v závislosti na osvětlení, rychlost větru 0 m/s, teplota ve stínu 19-21 °C

Měsíční vyrobené energie 2010



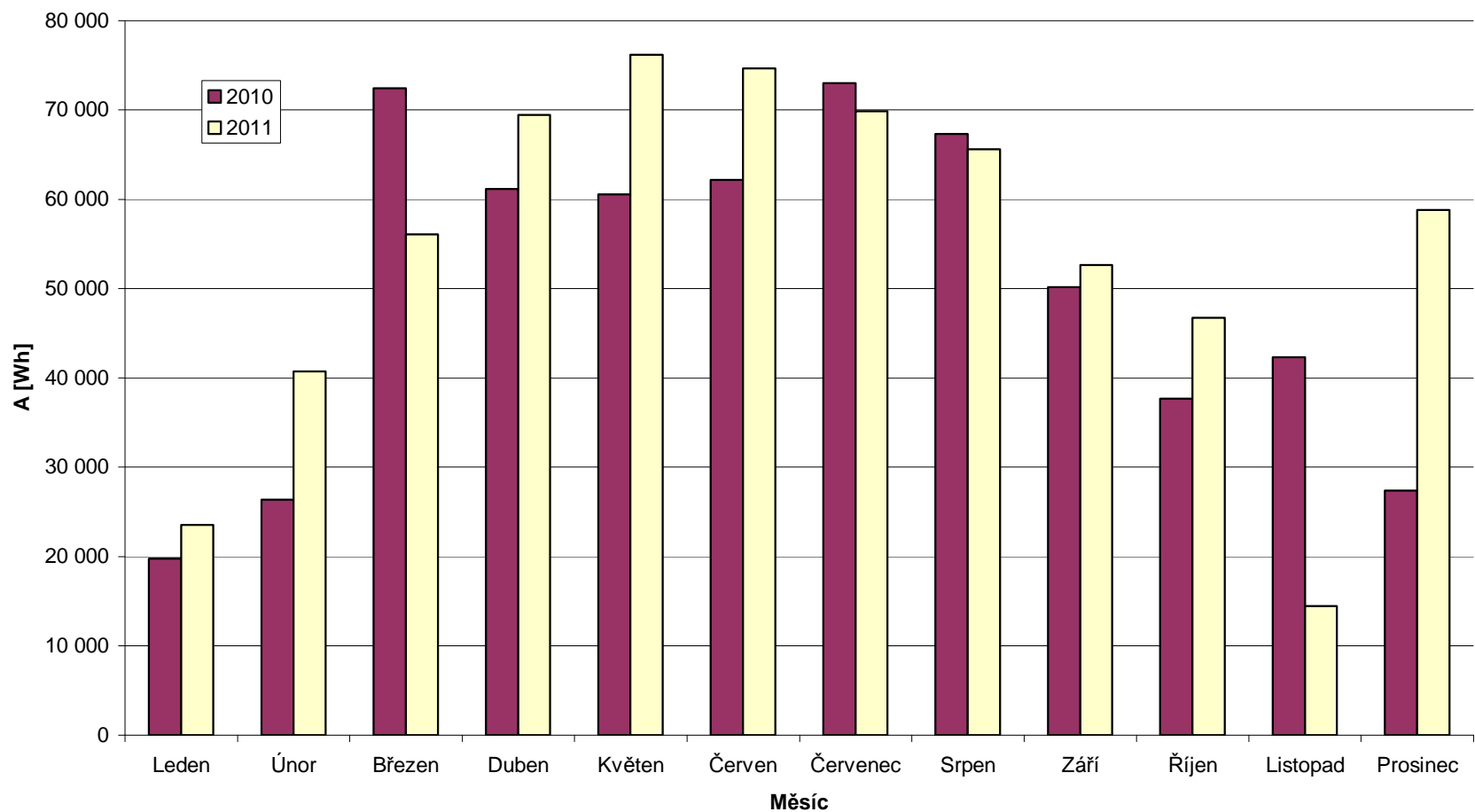
Graf 28 - Měsíční vyrobené energie 2010

Měsíční vyrobené energie 2011



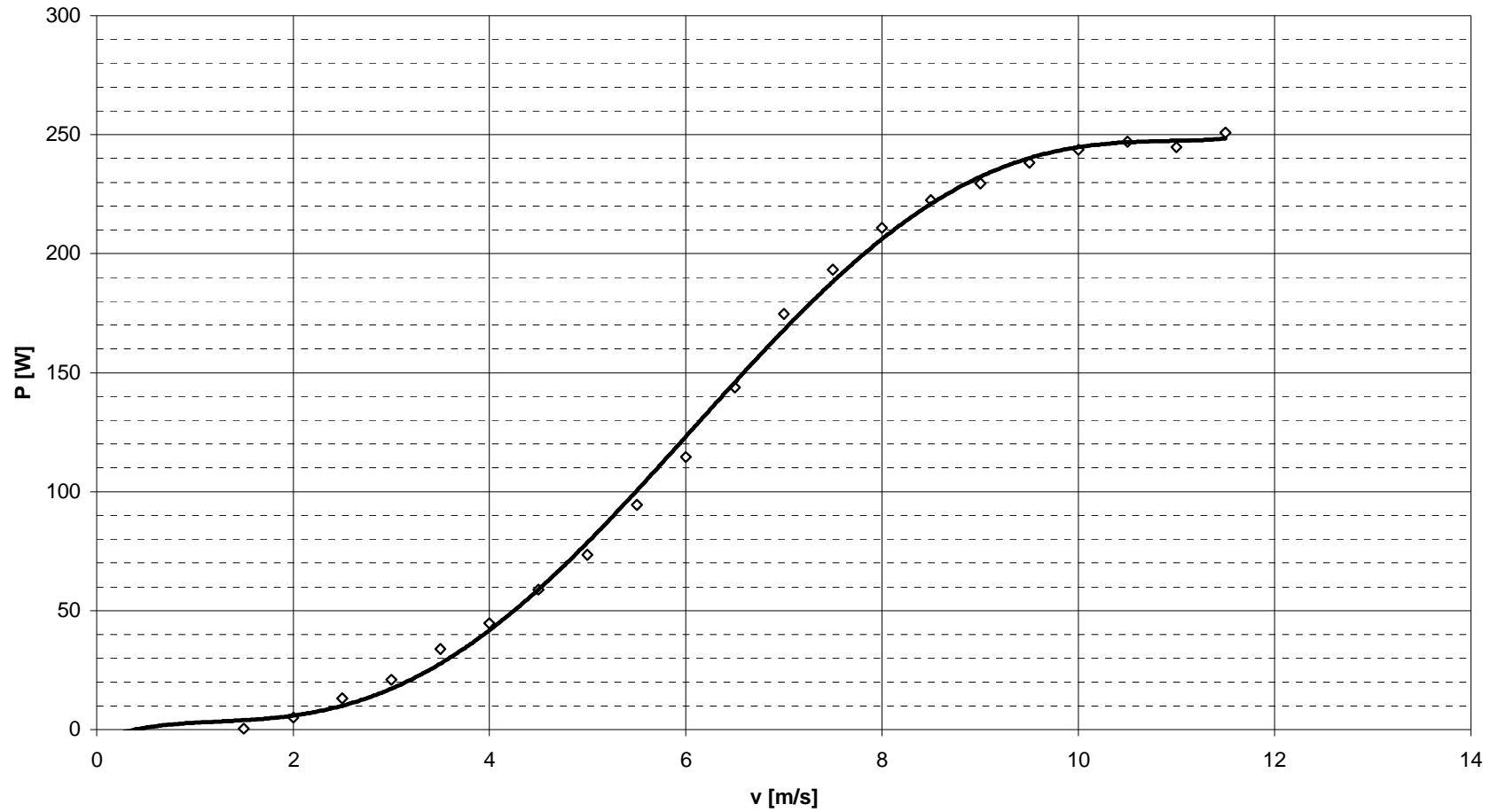
Graf 29 - Měsíční vyrobené energie 2011

Měsíční celkové vyrobené energie 2010 - 2011



Graf 30 - Měsíční celkové vyrobené energie 2010 - 2011

AeroCraft 500 - závislost výkonu na rychlosti větru



Graf 31 - AeroCraft 500 - závislost výkonu na rychlosti větru