

Modeling Photovoltaic Electricity Production in Bulgaria

Prof. Mladen Veleв, PhD

Technical University of Sofia
"Economics, Industrial Engineering and
Management" Department, Bulgaria
e-mail: mvelev@tu-sofia.bg

Liliya Ilieva, PhD Student

"Management and Business Development" Faculty,
Ruse University "Angel Kanchev", Bulgaria
e-mail: lilieva@uni-ruse.bg

Assoc. Prof. Todor Todorov, PhD

"Numerical Methods and Statistics" Department,
Ruse University "Angel Kanchev", Bulgaria
e-mail: ttodorov@uni-ruse.bg

Моделиране производството на електроенергия от фотоволтаични системи за условията на България

Проф. д-р Младен Велев

Технически университет София
Катедра "Икономика, индустриално инженерство и
Мениджмънт", България
e-mail: mvelev@tu-sofia.bg

Лилия Илиева, Докторант

Факултет „Мениджмънт и бизнес развитие“,
Русенски университет „Ангел Кънчев“, България
e-mail: lilieva@uni-ruse.bg

Доц. д-р Тодор Тодоров

Катедра „Числени методи и статистика“,
Русенски университет „Ангел Кънчев“, България
e-mail: ttodorov@uni-ruse.bg

Abstract: *The study analyzes the specific aspects of photovoltaic electricity production in Bulgaria. Monthly solar power output data for photovoltaic systems with different installed capacity and geographic location has been summarized and processed. Regression models have been developed for forecasting the solar power output and their adequacy has been assessed. The models can serve as a basis for calculation of the projected sales revenue from the generated electricity.*

Key words: *renewable energy sources, photovoltaic electricity production, solar power output prediction model, management of photovoltaic projects.*

Резюме: *В работата са анализирани специфичните особености на производството на енергия от фотоволтаични системи в България. Обобщени са и са обработени данни за месечното производство на енергия на различни по мощност и местоположение фотоволтаични инсталации. Получени са регресионни модели за прогнозиране производството на енергия и е оценена тяхната адекватност. Изведените модели са база за прогнозиране приходите от произведената електроенергия.*

Ключови думи: *възобновяеми енергийни източници, производство на електрическа енергия от фотоволтаични системи, модел за прогнозиране на производството, управление на проекти за производство на електрическа енергия от фотоволтаични източници.*

JEL Classification: Q40, Q42, Q47

I. Introduction

Photovoltaic systems /PVS/ for power production are a considerable and very promising part of the renewable energy sources /RES/. The abundance of solar energy and the free use of this environmentally-friendly resource are among the reasons why PVS are gradually becoming one of the world's fastest-growing power generation technologies contributing to mitigation of environmental problems and reducing dependence on imported sources of energy (EPIA, 2011). The geographic location of Bulgaria is a prerequisite for development of solar power technologies and an increase in electricity production from PVS. Photovoltaic /PV/ projects currently provide a stable guaranteed income for the Bulgarian entrepreneur for at least 20 years but involve a considerably high initial investment which accounts for the relatively long payback period (Ilieva, 2010).

The factors determining the technical and economic feasibility of PVS are a lot but the sales revenue from the generated electricity is certainly amongst the most significant ones. Its value is affected by the system parameters (type of solar panels, installed capacity, mounting structure, geographic location, etc.), the feed-in tariff, the grid-connection date, etc. (Ilieva, 2012). The main factor determining the amount of the sales revenue is the total electricity production of the solar installation.

The purpose of this paper is to propose a model for calculation of photovoltaic electricity output which can serve as a tool for evaluating the economic feasibility of investment.

II. Specific Aspects of Photovoltaic Electricity Production in Bulgaria

In the current global economic crisis the rational decision to invest in PVS in Bulgaria is mostly determined by the value of

I. Въведение

Фотоволтаичните системи /ФС/ за производство на електроенергия са съществен и силно перспективен дял от възобновяемите енергийни източници /ВЕИ/. Поради практическата неизчерпаемост на слънчевата енергия и възможността за безплатно използване на този природосъобразен ресурс, употребата на ФС постепенно се превръща в едно от най-динамично развиващите се направления в електроенергетиката в световен мащаб, като създава условия за редуциране на екологичните проблеми и намаляване зависимостта от вносни енергоизточници (EPIA, 2011). Географското положение на България е обективна предпоставка за развитие на слънчева енергетика и увеличаване производството на електроенергия от ФС. На този етап проектите за производство на енергия от соларни инсталации гарантират сигурен и стабилен приход за инвеститора в продължение на минимум 20 години, но изискват сравнително високи първоначални капиталовложения, което обуславя по-продължителния срок на възвръщаемост на инвестициите (Илиева, 2010).

Технико-икономическата ефективност на ФС е функция от много фактори, но несъмнено един от най-значимите е приходът от продажба на електрическа енергия. Той зависи от параметрите на системата (вид на панелите, мощност на инсталацията, конструкция на съоръженията, географско положение и т.н), от цената на произведената енергия, от момента на присъединяване на съответната централа към разпределителната мрежа и др. (Илиева, 2012). Основният фактор, определящ размера на приходите за инвеститора, обаче, е количеството електроенергия, произведено от соларната инсталация.

Цел на настоящата работа е да се предложи модел за оценка на производството на енергия от ФС, който да се използва като инструмент за прогнозиране на икономическата ефективност на инвестициите.

II. Особенности на производството на електрическа енергия от фотоволтаични системы в България

В условията на глобална икономическа криза рационалното решение за инве-

costs and the expected positive cash flows during the project life cycle. As operation and maintenance costs for photovoltaic installations are very low, the major cost component of photovoltaic projects is the value of capital expenditures which represents approximately 80-90% of the total investment (EPIA, 2011). Capital costs include the photovoltaic modules price, the expenses for inverters, structural components and balance of system elements, project planning, design, supply and construction, grid connection, engineering, project management and administration costs (Ilieva, 2012). The module price accounted for 45-60% of the total investment in 2010 depending on the technology type (crystalline silicon or thin film) (EPIA, 2011). The photovoltaic market has experienced unprecedented growth worldwide over the last years whilst the severe competition in the production industries for solar cells, modules and components, the optimization in the manufacturing processes and the economies of scale have driven the steady decline in module prices and the reduction in investment costs per unit of capacity. The average price of a PV module in the world markets reached 1-1,2 \$/W in the beginning of 2012 which is nearly 50% down on a year earlier and some 76% below the average price level in 2008, the first year of the world financial crisis (UNEP, 2012).

The average range of investment costs for photovoltaic projects in Bulgaria is much higher than the one in the European and world markets. The differences in the capital expenditures values are mainly due to the differences in the prices of the PVS components, the installation costs which range significantly depending on the unique characteristics of the terrain and the type of installation, the different financial climate and lending conditions, as well as the differences in the duration and costs for execution of the required legal-administrative procedures (EPTP, 2011; BPVA, 2011). Nevertheless, the global investment cost reduction course has also

стиране във ФС в България зависи в най-голяма степен от размера на разходите и очакваните положителни парични потоци по проекта. Предвид факта, че оперативните разходи и разходите за поддръжка на фотоволтаичните инсталации са много ниски, основният компонент на разходната част на фотоволтаичните проекти, съставляващ около 80-90% от всички разноски за предприемача, се определя от инвестиционните разходи (EPIA, 2011). Те включват цената на ФВ модули, инверторите, монтажните конструкции и останалите спомагателни елементи, цената на терена (при наземни ФВ проекти), разходите за планиране, проектиране, доставка и строителство, за свързване към мрежата, както и разходите за управление и администрация (Илиева, 2012). По данни за 2010 г. цената на ФВ модули формира между 45-60% от инвестиционните разходи и зависи от вида на избраната технология (кристален силиций или тънкослойни модули) (EPIA, 2011). През последните години използването на ФС бележи безпрецедентен ръст в световен мащаб, а изострената конкуренция в сектора за производство на фотоволтаични клетки, модули и компоненти заедно с оптимизациите в организацията на производството и икономии от мащаба обуславят устойчивото намаляване на цените на модулите и на инвестиционните разходи за единица мощност. Средната цена на ФВ модули в света в началото на 2012 г. достига 1-1,2 \$/W, което представлява спад от близо 50% в сравнение със средните ценови равнища през 2011 г. и понижение с около 76% спрямо средната цена през 2008 г., първата година на световната икономическа криза (UNEP, 2012).

Средният размер на капиталовите разходи за фотоволтаични проекти в България е значително по-висок от същия в Европа и света. Разликите в стойностите на инвестициите във ФС се дължат основно на различните цени на фотоволтаичните компоненти, на разнородните разходи за монтаж на системите, които до голяма степен се определят от особеностите на терена и типа инсталация, на разликите във финансовия климат и условията на кредитиране, както и на нееднаквата продължителност за извършване на необходимите правно-административни процедури и на различните разходи за тях (EPTP, 2011; БФА, 2011). Глобална-

been recorded for the PVS in Bulgaria. Table 1 below illustrates a comparison between capital expenditure values (CAPEX) for 2011 and 2012 for different types of photovoltaic plants as per the assessment of the State Energy and Water Regulatory Commission (SEWRC, 2011, 2012)

та тенденция за понижаване на инвестиционните разходи за фотоволтаични проекти, обаче, е налице и в България. Таблица 1 илюстрира сравнението на размера на капиталовите разходи (CAPEX) за различните типове фотоволтаични електроцентрали (ФЕЦ) за 2011 и 2012 г. съгласно оценките на ДКЕВР (ДКЕВР, 2011, 2012).

Table 1. Capital Expenditure for PVS 2011/2012
Таблица 1. Инвестиционни разходи за ФС 2011/2012

Type of PVP Вид ФЕЦ	CAPEX - 2011 (lv./kWp)	CAPEX - 2012 (lv./kWp)	% Change % Промяна
Roof and Building Integrated PVS below 30 kWp Покривни и фасадни ФЕЦ до 30 kWp	6177	4567	-26.06%
Roof and Building Integrated PVS 30 - 200 kWp Покривни и фасадни ФЕЦ 30 -200 kWp	6083	4176	-31.35%
Roof and Building Integrated PVS above 200 kWp Покривни и фасадни ФЕЦ 200 -1000 kWp	5946	3520	-40.80%
PVS below 30 kWp ФЕЦ до 30 kWp	5867	2934	-49.99%
PVS 30-200 kWp ФЕЦ 30-200 kWp	5770	2836	-50.85%
PVS above 200 kWp ФЕЦ над 200 kWp	4890	2543	-48.00%

The fairly serious investment, the difficult global economic situation and the restricted bank financing explain why the majority of PV projects implemented in various regions of Bulgaria are small-scale.

Basically, the installed capacity of most PVS is currently below 1MWp or the solar power installations were designed with a bigger capacity but have only been partially completed or grid-connected at present. Such small-scale decentralized PVS can be used locally thus reducing transmission/distribution losses, contributing to integration of the domestic energy market, increasing energy system flexibility and stability, allowing for more effective energy management, etc. (Albright, 2008; Luque, 2003).

The value of the positive cash flows associated with the photovoltaic projects is determined by the amount of electricity generated by the system and by the relevant feed-in tariff. In accordance with the Law on Energy from Renewable Sources (LERS) passed in 2011, the State Energy

Предвид сравнително сериозната инвестиция, влошената икономическа обстановка в световен мащаб и трудностите за осигуряване на финансиране, понастоящем в България се реализират сравнително малки по мощност ФС в различни райони на страната. Практически повечето системи са с инсталирана мощност под 1 MWp, или са проектирани с по-голям капацитет, но на този етап са само частично завършени и присъединени към електроразпределителната мрежа. Подобни малки по мощност децентрализирани ФС генерират електроенергия в близост до потребителя, като така допринасят за намаляване загубите от пренос в електроразпределителната система, способстват за интегриране на вътрешния енергиен пазар, осигуряват по-голяма гъвкавост и сигурност на електроенергийната система, по-ефективно управление и др. (Albright, 2008; Luque, 2003).

Положителните парични потоци при фотоволтаичните проекти зависят от произведеното количество енергия и от нейната изкупна цена. Съгласно Закона за енергията от възобновяеми източници в България (ЗЕВИ), приет през 2011

and Water Regulatory Commission (SE-WRC) sets on annual basis, by June, 30 of each year, preferential prices for purchase of electricity produced from renewable energy sources (RES). Electricity from renewable sources is purchased by the public provider/the end suppliers at the preferential price set by the Commission, effective as of the date of preparation of a statement of findings on the completion of the energy project. Electricity from renewable resources is purchased based on long-term purchase contracts which for the power produced from solar energy are signed for a term of twenty years. The term of the contract commences on the date of putting the system into operation; for installations launched after 31.12.2015 the contract duration is reduced with the time interval from 31.12.2015 to the date of putting the system into operation. The applicable preferential feed-in tariff remains unchanged for the entire duration of the long-term contract; when the contract expires, no more preferences are granted in terms of the prices (LERS, 2011).

In response to the growing investors' interest in photovoltaic projects and to a great extent as a logic consequence from the crisis in the world economy and the turbulence in the global finance industry, over the last years European governments started significantly reducing the support mechanisms for photovoltaic electricity production (JRC, 2011). There is obviously an effort for adjusting feed-in tariff subsidies for solar power to the rapid decrease in the cost of photovoltaic technology, thus restraining the growing returns of entrepreneurs. Consequently throughout Europe, including Bulgaria, feed-in tariffs programmes for photovoltaic electricity have been significantly reduced (RENI, 2012; UNEP, 2012).

Table 2 below illustrates a comparison between preferential prices for purchasing solar power in Bulgaria for 2011 and 2012 for different types of photovoltaic plants as per the assessment of the SEWRC (SE-WRC, 2011, 2012)

г., преференциалните цени за изкупуване на електроенергията, произведена от възобновяеми енергийни източници (ВЕИ) се определят ежегодно до 30 юни от ДКЕВР. Електрическата енергия, произведена от ВЕИ, се изкупува от обществения доставчик/крайните снабдители по определената от ДКЕВР цена, действаща към датата на съставяне на констативен акт за завършване изграждането на енергийния обект. Електрическата енергия, произведена от ВЕИ, се изкупува въз основа на сключени дългосрочни договори за изкупуване за срок, регламентиран в ЗЕВИ, който за електроенергията, произведена от ФС, е 20 години. Сроковете текат от датата на въвеждане в експлоатация на енергийния обект, а за енергийните обекти, въведени в експлоатация след 31.12.2015 г., сроковете се намаляват с времето от тази дата до датата на въвеждане в експлоатация на обекта. Цената на електроенергията от ВЕИ не се изменя за срока на договора за изкупуване, като след изтичането му преференции за цените не се предоставят (ЗЕВИ, 2011).

В отговор на растящия инвеститорски интерес към фотоволтаичните проекти и до голяма степен като логична последица от световната икономическа криза и турбуленциите в глобалната финансова индустрия, през последните години правителствата в Европа започват да редуцират механизмите, стимулиращи производството на електроенергия от ФС (JRC, 2011). Налице е стремеж преференциалните цени за изкупуване на електроенергията от соларни инсталации да отговарят на бързото снижение на инвестиционните разходи за фотоволтаичните технологии, като така се ограничат растящите маржове на печалба на предприемачите. В резултат в цяла Европа, в т.ч. и в България, се наблюдава значително редуциране на преференциалните цени за изкупуване на електроенергията, произведена от ФС (RENI, 2012; UNEP, 2012).

Таблица 2 илюстрира сравнението на преференциалните цени за изкупуване на електрическата енергия за различните типове ФЕЦ в България за 2011 и 2012 г. съгласно оценките на ДКЕВР (ДКЕВР, 2011, 2012).

Table 2. Preferential Prices for Photovoltaic Power 2011/2012**Таблица 2.** Преференциални цени за изкупуване електроенергията от ФС 2011/2012

Type of PVP Вид ФЕЦ	Pref. Price – 2011 Преф. цена - 2011 (lv./MWh)	Pref. Price – 2011 Преф. цена - 2011 (lv./MWh)	% Change % Промяна
Roof and Building Integrated PVS below 30 kWp Покривни и фасадни ФЕЦ до 30 kWp	605.23	400.70	-33.79%
Roof and Building Integrated PVS 30 - 200 kWp Покривни и фасадни ФЕЦ 30 -200 kWp	596.50	369.08	-38.13%
Roof and Building Integrated PVS above 200 kWp Покривни и фасадни ФЕЦ 200 - 1000 kWp	583.77	316.11	-45.85%
PVS below 30 kWp ФЕЦ до 30 kWp	576.50	268.68	-53.39%
PVS 30-200 kWp ФЕЦ 30-200 kWp	567.41	260.77	-54.04%
PVS above 200 kWp ФЕЦ над 200 kWp	485.60	237.05	-51.18%

The current paper analyses the produced electricity data for the period 2009-2012 for eight Bulgarian solar power installations. The data analysis indicates that the electric power output of the PVS has a seasonal and random pattern. Moreover, the amount of generated electricity depends on a number of both external factors (environmental conditions) and internal parameters of the PVS (technology type, system layout). The main factors determining the electricity production of a PVS are the power of the installation, the orientation and the tilt angle (inclination) of the panels towards the sun, the geographic location of the site, the climate zone and the irradiance value (ЕПТР, 2012). The intensity of the generated power depends also on the season, the hour of the day, the ambient temperature and the temperature of the panels, the air circulation /wind speed/, the shadows on the modules, etc. (Martev, 2010; Mladencheva, 2007). The readings of the produced electricity are recorded by the utility companies and paid on a monthly basis and it is logical to similarly plan all project activities.

Table 3 shows the monthly power output data of PVS in Bulgaria for the period 2010-2012.

За целите на текущото изследване са анализирани данни за производството на електрическа енергия за периода 2009-2012 г от осем ФС у нас. Анализът показва, че производството на електроенергия от соларни инсталации има сезонен и случаен характер. При това, количеството на генерираната електрическа енергия зависи както от редица външни фактори (фактори на околната среда), така и от вътрешните параметри на ФС (технология и проектиране). Основните фактори, които определят производството на електрическа енергия от ФС са мощността на инсталацията, ориентацията и наклона на панелите спрямо слънцето, географското положение на терена, климатичната зона и слънчевата радиация (ЕПТР, 2012). Интензивността на генерираната електроенергия зависи още от сезона, часа от денонощието, околната температура и температурата на панелите, циркулацията на въздуха /скоростта на вятъра/, засенчването на панелите и др. (Мартев, 2010; Младенчева, 2007). Произвежданата енергия се отчита и изплаща месечно и е логично всички проектни дейности да се планират по аналогичен начин.

В таблица 3 са представени данни за месечното производство на електрическа енергия за ФС у нас за периода 2010-2012 г.

Fig. 1 indicates the yearly power output of three of the PVS for 2011. Data smoothing was made to illustrate the generated electricity pattern across the months. The analysis of the PV power curves unambiguously suggests that the season affects the monthly output. Therefore, when additional research is done the months will be divided in series and specific models for forecasting the power output will be sought for each series. Hence the forecast is expected to be more accurate and the error minimized. Moreover, the predicted estimates will be more precise if the model is based on the monthly power output data series for several consecutive years.

На фиг. 1. са визуализирани кривите за годишното производство на електрическа енергия за 2011 г. за три от системите, като данните са изгладени, за да се очертае характерът на разпределението по месеци. Анализът на кривите от фиг. 1 категорично показва, че месечното производство е различно през различните сезони. Това изисква на един следващ етап месеците да се класифицират по групи и да се търсят различни модели за прогнозиране производството на енергия за различните групи месеци. Прогнозирането по този начин би било по-прецизно и би довело до по-малки грешки. По-добра прогноза би се получила, ако се моделира производството на база данни по месеци за няколко последователни години.

Table 3. Monthly Solar Power Output

Таблица 3. Месечно производство на електроенергия от ФС

	PVS ФС	Installed Capacity Мощност /KWp/	Period Пери- од	Jan Яну- ари	Feb Февр.	Mar Март	Apr Апр.	May Май	Jun Юни	Jul Юли	Aug Ав- густ	Sep Септ.	Oct Окт.	Nov Но- ем.	Dec Дек.
1	ZITA, Ruse ЗИТА, Русе	117.24	2010	2 782	6 871	10 544	15 903	16 225	16 416	15 794	17 598	14 408	8 557	7 963	5 042
			2011	4 016	7 925	12 127	13 219	16 406	17 077	18 665	18 074	15 734	10 797	7 185	5 128
			2012	5 591	5 800	15 818									
2	Bryagovo, Plovdiv Брягово, Пловдив	66.30	2010	2 679	4 335	7 128	8 425	10 228	8 674	9 813	10 926	9 066	5 721	5 723	4 214
			2011	4 949	5 123	6 692	8 723	9 920	10 420	10 672	10 753	9 519	6 277	5 572	3 698
			2012	4 318	4 050	8 332									
3	Intercom Complect, Plovdiv Интерком Ком- плект, Пловдив	19.44	2010	654	933	1 805	2 271	2 976	2 562	2 978	3 020	2 202	1 297	1 189	807
			2011	962	1 048	1 713	2 488	2 730	3 026	3 063	3 050	2 409	1 637	1 236	892
			2012	787	592	2 129									
4	Begovo, Karlovo Бегово, Карлово	59.40	2010											508	3 707
			2011	4 311	4 583	6 613	8 342	8 989	9 979	10 165	10 349	8 832	6 117	4 999	3 771
			2012	3 999	3 682	7 952									
5	Stara Zagora Стара Загора	24.40	2010						903	1 410		2 002	1 576	1 283	970
			2011	1 080	1 376	1 626	1 361	3 277	3 980	4 292	3 823	3 177	1 906	1 245	413
			2012	1 232	1 509	2 665									
6	Yalovo, V. Tarnovo Ялово, В. Търново	3.84	2010							360	186	423	243	253	112
			2011	116	181	268	383	490	560	597	580	504	274	236	164
			2012	98	96	380									
7	Nova cherna, Silistra Нова черна, Силистра	77.58	2010												
			2011						6 642	13 041	12 024	8 825	5 721	3 701	2 664
			2012	3 881	3 252	9 936									
8	Malenovo, Straldzha Мале- ново, Стралджа	74.25	2010												
			2011							6 491	12 107	11 538	6 879	6 219	3 330
			2012	4 584	5 369	10 182									

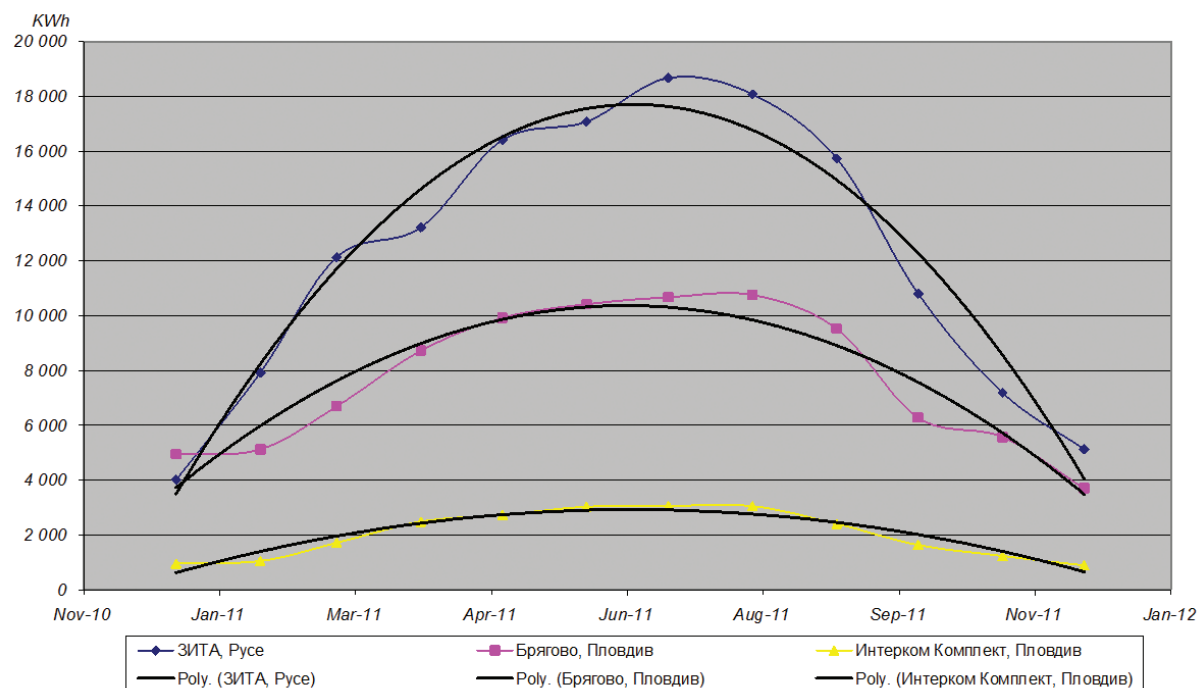


Fig. 1. Solar Power Output Curves for 2011

Фиг. 1. Криви на производството на електрическа енергия от ФС за 2011 г.

III. Research Methodology

The current research is based on the monthly power output data for the period 2009 - 2012 for eight Bulgarian stationary solar power installations which were not connected to the distribution grid at the same time - Zita, Ruse - 117,24 KWp; Bryagovo, Plovdiv /the PV array connected to the grid in 2009/ - 66,30 KWp; Intercom Complect, Plovdiv- 19,44 KWp; Begovo, Karlovo - 59,4 KWp; Stara Zagora - 28,4 KWp; Yalovo, Veliko Tarnovo - 3,84 KWp; Nova Cherna, Silistra - 77,58 KWp; Malenovo, Yambol - 74,24 KWp. Fig. 2 indicates the geographic location of the above-mentioned PVS on the map of Bulgaria. Not much data is available for some of the PVS due to their later connection to the distribution grid. Nevertheless, the curve pattern of the monthly power output data is similar in all studied solar installations.

The statistical package Statgraphics Centurion XV is used to obtain models for solar power output forecasting for the first three PVS (Zita, Ruse; Bryagovo, Plovdiv; Intercom Complect, Plovdiv) for which the longest data sets are available. Statgraphics Centurion XV is a widely used software

III. Методика на изследването

Изследването в работата се базира на данни за месечното производство на електрическа енергия за периода 2009 - 2012 г. от 8 стационарни ФС у нас, присъединени по различно време към електроразпределителната мрежа: ЗИТА, Русе - 117,24 KWp; Брягово, Пловдив / блокът, присъединен през 2009 г./ - 66,30 KWp; Интерком Комплект, Пловдив - 19,44 KWp; Бегово, Карлово - 59,4 KWp; Стара Загора - 28,4 KWp; Ялово, Велико Търново - 3,84 KWp; Нова Черна, Силистра - 77,58 KWp; Маленово, Ямбол - 74,24 KWp. На фиг. 2 върху картата на България е показано географското разположение на въпросните ФС, за които са анализирани данните. За някои от обектите данните са ограничени, поради по-късното присъединяване на фотоволтаичните мощности към електроразпределителната мрежа, но характерът на кривите, показващи месечното производство на електрическа енергия за България, е аналогичен.

Чрез статистическия пакет Statgraphics Centurion XV са получени модели за прогнозиране производството на електроенергия на първите 3 ФС /Зита, Брягово, Интерком Комплект, Пловдив/, за които са събрани данни за най-продължителен период. Statgraphics Centurion XV е

tool for statistical data analysis which includes over 160 statistical procedures for basic statistical analyses of empirical data, regression analysis, analysis of variance, distribution patterns, statistical estimation and hypothesis testing, statistical forecasting, implementing nonparametric methods, etc.

масово разпространен статистически софтуерен пакет, чрез който могат да се реализират над 160 статистически процедури в области като първична обработка на емпирични данни, регресионен и дисперсионен анализ, характеризиране на разпределения, статистическо оценяване и проверка на хипотези, статистическо-прогностични изследвания, непараметрични техники и други.

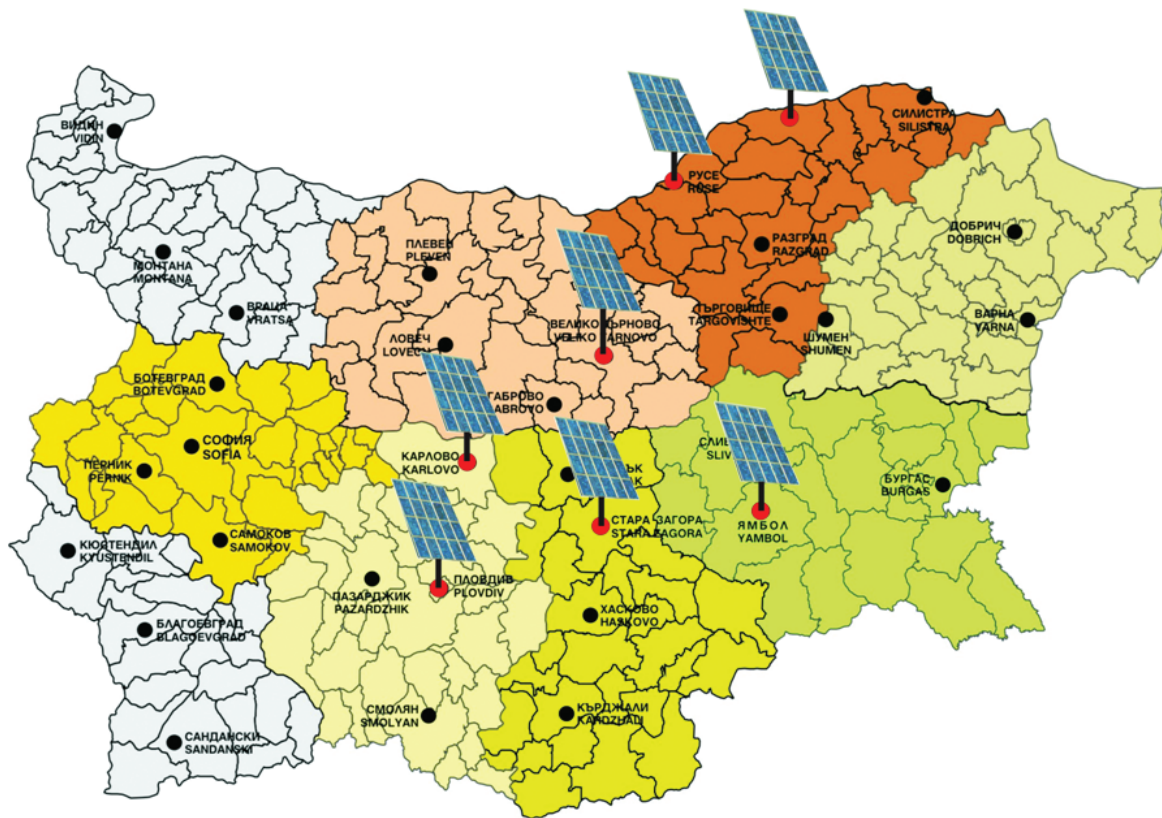


Fig. 2. Geographic Location of the PVS Examined in the Study

Фиг. 2. Местоположение на ФС, предмет на изследването

IV. Simulation Modeling Results

The electricity production models of the three PVS listed above, following exclusion of the variables with insignificant coefficients, are graphically presented below. The sequence number of the year is denoted as x_1 in regression equations (1), (2) and (3), the sequence number of the month as x_2 and the predicted estimate for the PV electricity production as Y . The values of the coefficient of determination R^2 indicate that the models are adequate.

IV. Резултати от симулационното моделиране

Моделите на електропроизводството на трите посочени по-горе ФС след изключване на членовете с незначими коефициенти са представени графично по-долу. С x_1 в регресионни уравнения (1), (2) и (3) е означен поредният номер на годината, с x_2 – поредният номер на месеца, а с Y – прогнозното количество произведена електроенергия. Стойностите на съответните коефициенти на определеност R^2 показват, че моделите са адекватни.

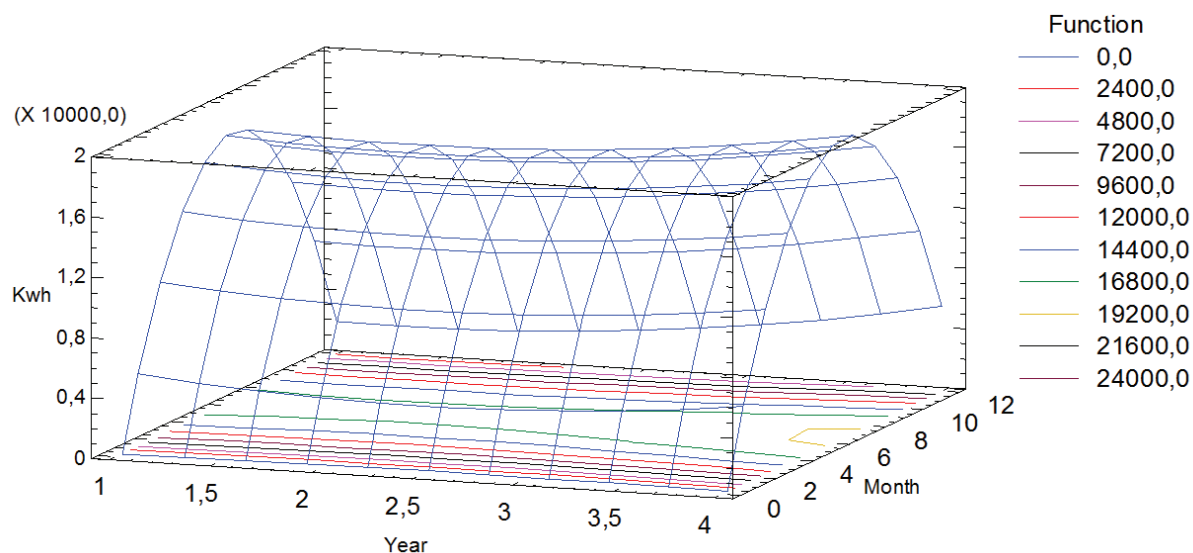


Fig. 3. Statistical Graphics of Zita, Rousse Model

Фиг. 3. Графично представяне на регресионния модел на фотоволтаичното електропроизводство на Зита, Русе

The regression equation of the Zita, Rousse PVS model is as follows:

Регресионно уравнение на модела на електропроизводството на ФС Зита, Русе е:

$$Y = -2507,4.x_1 + 6185,79.x_2 + 99,1142.x_1.x_2 + 497,934.x_{12} - 495,032.x_{22} \quad (1)$$

$$R^2 = 98,7697 \%$$

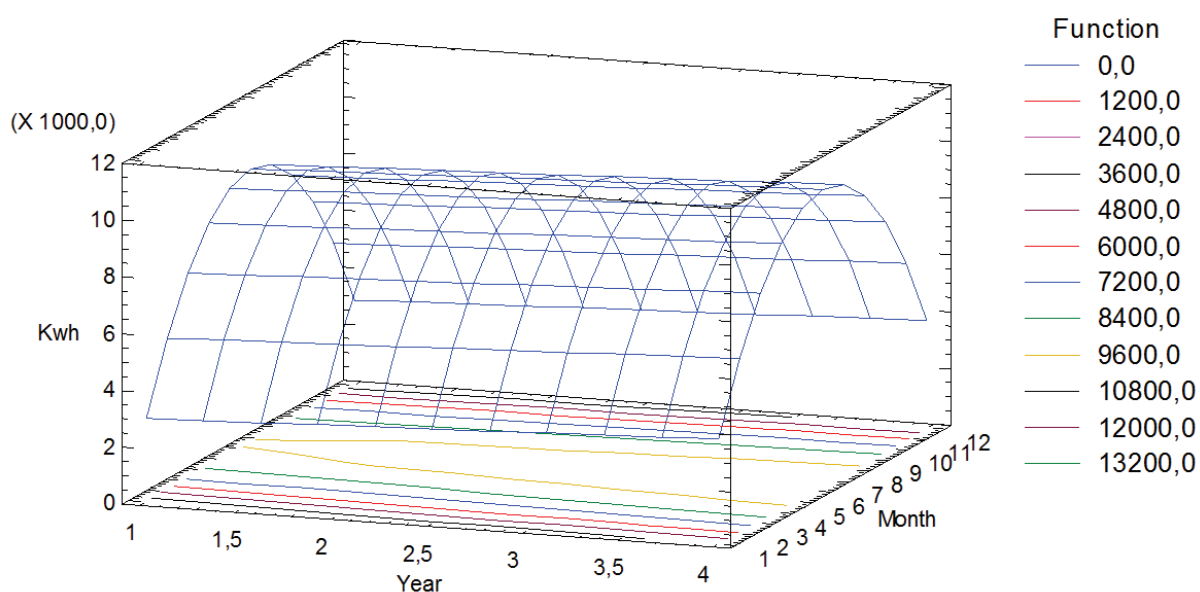


Fig. 4. Statistical Graphics of Bryagovo, Plovdiv PVS

Фиг. 4. Графично представяне на регресионния модел на фотоволтаичното електропроизводство на Брягово, Пловдив

The regression equation of the Bryagovo, Plovdiv PVS model is as follows:

Регресионно уравнение на модела на електропроизводството на ФС Брягово, Пловдив е:

$$Y = 257,752.x_1 + 2892,39.x_2 - 221,92.x_{22} \quad (2)$$

$$R^2 = 98,6809 \%$$

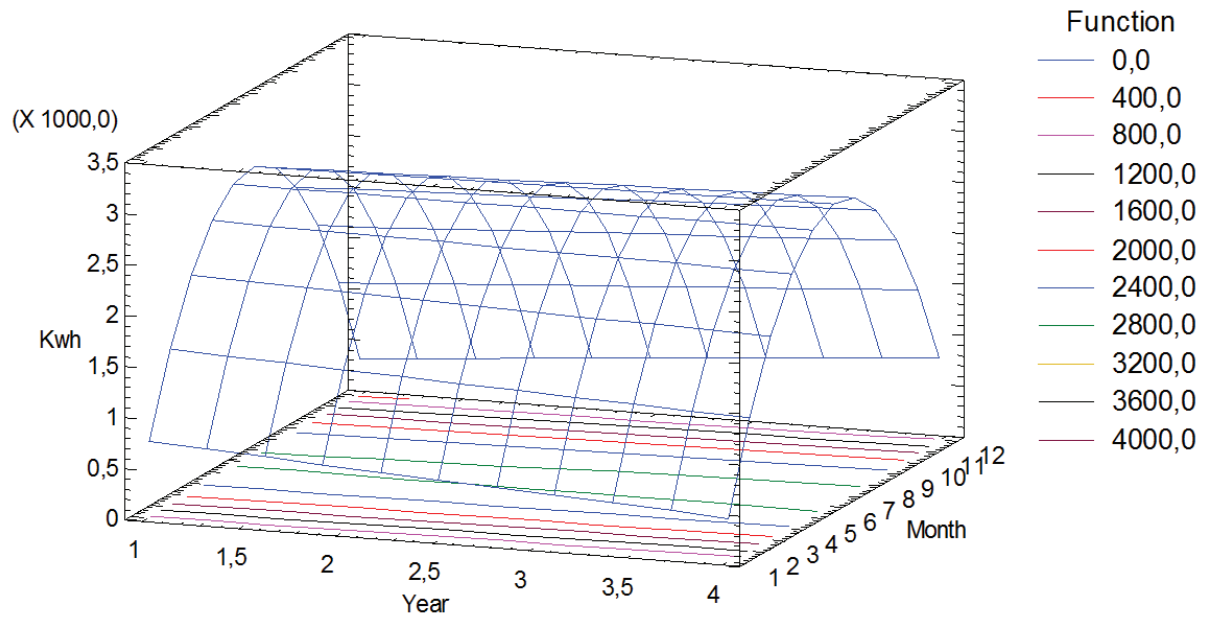


Fig. 5. Statistical Graphics of Intercom Complect, Plovdiv PVS

Фиг. 5. Графично представяне на регресионния модел на фотоволтаичното електропроизводство на Интерком Комплект, Пловдив

The regression equation of Intercom Complect, Plovdiv PVS model is as follows:

Регресионно уравнение на модела на електропроизводството на ФС Интерком Комплект, Пловдив е:

$$Y = -128,534.x_1 + 926,041.x_2 + 22,9876.x_1.x_2 - 75,679.x_{22} \quad (3)$$

$R^2 = 98,1875 \%$

It can be concluded that the developed multiple regression models provide a fairly accurate description of the monthly solar power output of the particular PVS with their specific technical parameters and location. The models allow for simulating the expected monthly and yearly PV power production in the relevant climatic areas of Bulgaria and provide a basis for calculation of the projected cash inflows in solar power ventures. The models are undoubtedly adequate for the observed data. The total error of the yearly solar power output is within the allowable limit although for some of the months it can be statistically significant.

The predicted estimates for the PV electricity production are to be considered for normal operating conditions without emergency breakdowns. Assessment of the risks of power generation stoppages due to technical failures, natural disasters, etc. should be made, as such risks have not been evaluated in the current study.

След изграждането на многофакторните регресионни модели може да се направи заключението, че получените модели достатъчно точно описват производството на електрическа енергия по месеци за конкретните ФС в зависимост от техните технически параметри и местоположение. Моделите позволяват да се симулира очакваното месечно и годишно електропроизводство за съответните климатични райони на страната и дават основа за калкулиране на прогнозните положителни парични потоци в съответните фотоволтаични проекти. Адекватността на моделите е категорична. Получената сумарна грешка за годишно производство е в границите на допустимата, независимо че за някои месеци тя може да е по-значима.

Резултатите от прогнозирането са добри при условията на безаварийна работа на ФС. Необходимо е да се направи и оценка за риска от срыв на производството в резултат на аварии, природни бедствия и др., които не са заложили в получените модели.

V. Conclusions

The study analyzes the specific aspects of photovoltaic electricity production in Bulgaria. Monthly solar power output data for 8 PVS with different installed capacity and geographic location has been summarized and processed. Adequate regression models have been developed for forecasting the solar power output. The analysis of the relevant models indicates that developing generalized models for forecasting the solar power output, valid for any situation and every PVS, is impracticable. Each specific simulation model reflects the particular characteristics of the solar power system and its siting. Each model is unique subject to the geographic location and technical specification of the respective PV installation. Nevertheless, the models developed in the current study can serve as a basis for predicting the solar power output and the sales revenue from the generated electricity for PVS in the same geographic location and having similar installed capacity and technical characteristics

V. Заключение

В работата са анализирани специфичните особености на производството на енергия от фотоволтаични системи в България. Обобщени са и са обработени данни за месечното електропроизводство на 8 соларни електроинсталации, различаващи се по мощност и местоположение. Получени са адекватни регресионни модели за прогнозиране производството на енергия. Анализът на моделите на отделните ФС показва, че не могат да се изготвят обобщени модели за прогнозиране на електропроизводството, които да са валидни за всички случаи и всякакви ФС. Всеки конкретен симулационен модел отразява спецификата на ФС и местоположението и. В различните географски райони и при различни технически характеристики на ФС моделите се различават чувствително. Получените модели, обаче, могат да се използват като база за прогнозиране количествата произведена електроенергия и постъпленията от продажбата ѝ в съответния географски район и то при соларни електроинсталации с подобни мощности и технически спецификации.

Reference/Литература

- [1]. **Albright, L. D., Vanek, F. M.**, 2008, Energy Systems Engineering. Evaluation and Implementation // McGraw-Hill
- [2]. **Bulgarian Photovoltaic Association**, 2011, Reduction of Legal-Administrative Barriers for Photovoltaic Systems Installation in Bulgaria, PV Legal Project under the Intelligent Energy Europe Programme
- [3]. **European Photovoltaic Industry Association**, 2012, Global Market Outlook for Photovoltaics until 2016
- [4]. **European Photovoltaic Industry Association**, Greenpeace, 2011, Solar Generation 6, Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World
- [5]. **European Photovoltaic Industry Association**, 2011, Solar Photovoltaics. Competing in the Energy Sector
- [6]. **European Photovoltaic Technology Platform**, 2011, A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology, Edition 2
- [7]. **European Photovoltaic Technology Platform**, 2012, My PV Project: Frequently Asked Questions
- [8]. **Frankfurt School UNEP Collaborating Centre for Climate & Sustainable Energy Finance**, 2012, Global Trends in Renewable Energy Investment 2012
- [9]. **Ilieva, L.**, 2012, An Algorithm for Assessing the Economic Feasibility of Investment in Photovoltaic Systems in Bulgaria // Proceedings of Jubilee X International Scientific Conference „Management and Engineering '12“, Sozopol, Volume II
- [10]. **Ilieva, L.**, 2010, Analysis of Photovoltaic Electricity Production in Bulgaria // Proceedings of Ruse University “Angel Kanchev”, Vol. 49, Book 1.2
- [11]. **Ilieva, L.**, Article in Press, Photovoltaic Electricity Production – A Promising Innovation for Bulgaria
- [12]. **Joint Research Centre – European Commission, Institute for Energy**, 2011, PV Status Report 2011
- [13]. **Law on Energy from Renewable Sources**, 2012, Bulgaria
- [14]. **Luque, A., Hegedus, S.**, 2003, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering // Wiley, Chichester, West Sussex, England
- [15]. **Martev, K., Koev, N. Nedev**, 2010, An Investigation of the Influence of Some Factors on Photovoltaic Modules Electrical Power Generation // Proceedings of Ruse University “Angel Kanchev”, 2010, Vol. 49, Book 3.1
- [16]. **Mitkov A.**, 2011, Theory of Experiments // Dunav Press, Ruse
- [17]. **Mladencheva, R.**, 2007, Photovoltaic Generators // Ekovat Technologies, Sofia
- [18]. **Renewables Insight**, 2012, PV Power Plants 2012 – Industry Guide
- [19]. **State Energy and Water Regulatory Commission**, Resolution C-18/28.06.2012, Bulgaria
- [20]. **State Energy and Water Regulatory Commission**, Resolution C-18/20.06.2011, Bulgaria