

**SOME NEW ASPECTS IN THE LIGHTNING PROTECTION OF  
PHOTOVOLTAIC ELECTRICAL POWER PLANTS****Георги Велев\*, Красимир Иванов, Петър Петров***TU – Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ 4, Габрово, България**\*кореспондиращ автор: g\_velev@tugab.bg***НЯКОИ НОВИ МОМЕНТИ ПРИ МЪЛНИЕЗАЩИТАТА НА  
ФОТОВОЛТАИЧНИ ЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ****Georgi Velev\*, Krasimir Ivanov, Petar Petrov***TU – Gabrovo, 4 Hadzhi Dimitar str., Gabrovo, Bulgaria**\*Corresponding author: g\_velev@tugab.bg***Abstract**

*In the recent years, the design, construction and operation of photovoltaic power plants have seen significant growth. In addition, the issue of the effectiveness of external lightning protection of strings with photovoltaic panels becomes relevant. The paper inhere aims to summarize the existing techniques for the design and construction of conventional lightning protection of photovoltaic panels, to propose some new solutions and to give examples of their application.*

**Keywords:** lightning protection; lightning protection zone (LPZ); lightning rod; photovoltaic (PV) modules; string.

**ВЪВЕДЕНИЕ**

Секторът на възобновяемата енергия у нас се развива изключително бързо в последните години. Към момента у нас има инсталирани 6757 MW ВЕИ мощности, от които 3612 MW (53,4%) са фотоволтаични. Всъщност основната част от фотоволтаичните електрически централи (ФЕЦ) у нас бива инсталирана в два времеви периода. Първият е 2010-2012 г., когато нови мощности се инсталират ударно в следствие на понижени инвестиционни разходи и държавни политики за преференциални цени и дългосрочни договори за изкупуване на енергията. Вторият започва около 2021 г., когато цените на енергията у нас достигат рекордни нива и фотоволтаичните централи генерират огромни печалби, заради ниските си производствени разходи, което ги прави и атрактивна инвестиция.

Фотоволтаичните мощности са сравнително равномерно разпределени из страната. Слънчевото електропроизводство е най-силно застъпено в Горнотракийската низина и средната част на Дунавската равнина, като равният релеф и продължителното слънчево греене през годината правят тези територии изключително подходящи за този тип централи. Най-много инсталирани ФЕЦ мощности има в община Пазарджик (304 MW), където се намира и най-големият соларен парк у нас – ФЕЦ „Риал Стейтс“ в село Априлци (251,2 MW). След нея се нареждат общините Сливен (295,5 MW), Гълъбово (204,5 MW) и Калояново (201,5 MW).

След 2023 г. започва ударно изграждане на ФЕЦ в цели 226 от 265 общини, като териториално те са концентрирани най-вече в централните части на страната. Най-много нови фотоволтаични мощности са въведени в общините Сливен (220,4 MW), Гълъбово (203,4 MW),

Севлиево (150 MW) и Ловеч (117,5 MW), като в Гълъбово и Ловеч новият фотоволтаичен капацитет е структуриран като един мащабен ФЕЦ на територията на общината [1, 2].

Директните и индиректни удари на мълнии върху елементи от фотоволтаична система могат да индукират атмосферни и комутационни пренапрежения, които да предизвикат сериозни повреди на PV модулите, инверторните групи и другите електрически и електронни компоненти във фотоволтаичните електроцентрали.

В представения доклад се акцентира върху ефективността на външна мълниезащита на стринговете с фотоволтаични панели. Направен е опит да бъдат обобщени съществуващите техники за проектиране и изграждане на конвенционална външна мълниезащита на фотоволтаичните панели, да се предложат някои нови решения и да се дадат примери за тяхното приложение.

## **АКТУАЛНО СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА. НОРМАТИВНА РАМКА**

При съвременният ръст на изграждане на фотоволтаични електроцентрали с големи инсталирани мощности става актуален въпросът за тяхната ефективна външна мълниезащита.

В страната външната мълниезащита на открити пространства с инсталирани стрингове от фотоволтаични панели се реализира по два начина – чрез системи с активни мълниеприемници и със системи с конвенционални мълниеприемници тип вертикален прът.

Активната мълниезащита в някои държави от ЕС, като Германия например е напълно забранено [3].

В Р България активните мълниеприемници са забранени за мълниезащита на разпределителни уредби и прилежащите към тях сгради в подстанции и електроцентрали [4]. Масово се използват те обаче за мълниезащита на сгради и открити пространства в съответствие с На-

редба 4/2010 г. [5], както и по изключение за някои съществуващи фотоволтаични електроцентрали в страната.

Въпреки, че на теория активните мълниеприемници имат многократно по-голяма мълниезащитна зона, което улеснява значително проектантите като същевременно намалява разходите за материали и монтаж, тяхното приложение за мълниезащита на фотоволтаични паркове трябва да се избягва.

За фотоволтаични електроцентрали с мощност по-голяма от 10 kWp се изисква мълниезащитна система от клас III и вътрешна защита от пренапрежения по препоръка на VDS (европейски стандарт за противопожарна защита и сигурност).

Системата на мълниезащита от клас III отговаря на обичайните изисквания за фотоволтаични системи съгласно БДС EN 62305-3:2011 [6].

Препоръчително е обаче винаги да се прави анализ на риска от попадение на мълнии там, където се планира инсталирането на фотоволтаична централа, тъй като ако тя се намира в зона с висока интензивност на мълниезащитната дейност, вероятно ще се наложи изграждането на система от първо или второ ниво на мълниезащита.

Измервателните сензори за скоростта на вятъра и температурата на модула също се инсталират в защитната зона на мълниеприемниците. По този начин се предотвратява постъпването на тока на мълнията и опасни пренапрежения в измервателните линии [7].

## **ПРИЛАГАНИ В ПРАКТИКАТА МЕТОДИ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА МЪЛНИЕЗАЩИТНАТА ЗОНА НА СТРИНГОВЕ ОТ ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ**

### **■ Най-често използвани конструкции на стринговете с ФВ панели**

За реализация на големи проекти на ФЕЦ, стринговете от ФВ панели се проектират и изграждат по две конструкции:

#### **✓ Едноскатна конструкция**

При едноскатната конструкция стринговете от фотоволтаични панели се монтират върху наклонена метална конструкция с южна ориентация и оптимален фиксиран ъгъл спрямо хоризонта средно за страната около 32 градуса (за летния сезон) и около 57 градуса (за зимния сезон), като точната фиксирана стойност се избира по критерия максимален годишен добив (фиг. 1)



Фиг. 1. Едноскатен монтаж на ФВ панели

#### ✓ Двускатна конструкция

При тази конструкция стринговете от фотоволтаични панели се монтират върху наклонена метална конструкция от двускатен тип с ориентация изток-запад и оптимален фиксиран ъгъл спрямо хоризонта около 10 - 15 градуса.



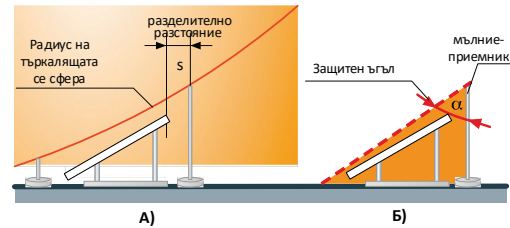
Фиг. 2. Двускатен монтаж на ФВ панели

В настоящата публикация са разгледани основни моменти от проектирането на мълниеващитната зона при едноскатно и двускатно разполагане на стринговете от фотоволтаични панели.

#### ■ Изисквания към монтажа на мълниеприемниците

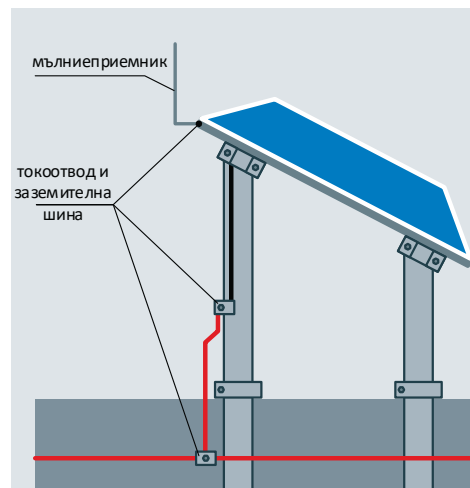
Конвенционалните вертикални мълниеприемници могат да се разположат като отделно-стоящи (фиг. 3) или дирек-

тно-монтирани върху металната конструкция на стринга (фиг. 4).



Фиг. 3. Конвенционална мълниеващитна на ФВ панели с отделностоящи мълниеприемници: А) при използване на методът на въртящата сфера; Б) при използване на методът на защитния ъгъл

При използване на конструкцията от фиг. 3 е необходимо гарантирането на разделителни разстояния от конструкцията на ФВ стринг от 0,5 до 1 m.



Фиг. 4. Конвенционална мълниеващитна на ФВ панели с директен монтаж върху носещата метална конструкция.

При мълниеприемници монтирани директно върху конструкцията на ФВ стринг металната конструкция, носеща панелите представлява съставна част от токоотводите, свързващи мълниеприемниците със заземителното устройство [3].

Задължително е носещите конструкции на панелите да се свързват със заземителната система на всеки 10 m разстояние по дължината на стринга.

Заземителната система на фотоволтаични електроцентрали, разположени в

открити пространства, се проектира като затворен контур с размери 20 x 20 m до 40 x 40 m.

Отделните заземители в контура се разполагат на дълбочина в почвата най-малко 0,5 m. Съпротивлението на заземяване е необходимо да бъде не повече от 10  $\Omega$  [7].

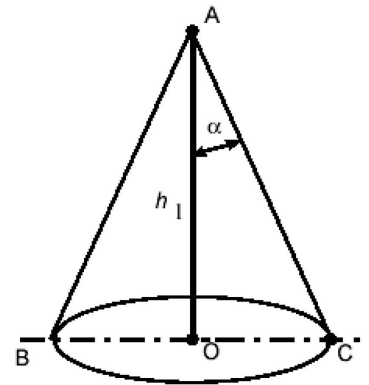
▪ **Методи за проектиране на мълние-защитната зона на ФВ стрингове**

Необходимото ниво на мълниезащита за конкретна ФВ електроцентрала се определя от резултатите получени при оценката на риска за поражения от мълниеносна дейност, в съответствие със стандарта БДС EN IEC 62305-2:2024) [8]. В много от случаите, необходимото ниво на мълниезащита е **първо ниво** ( $\eta > 0,98$ ) или **второ ниво** ( $\eta = 0,95 - 0,98$ ), което отговаря на мълниезащитна зона **тип А** ( $\eta \geq 0,995$ ) или **тип Б** ( $\eta \geq 0,95$ ).

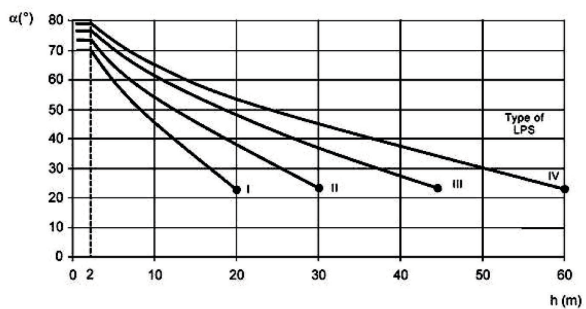
Броят на мълниеприемниците и тяхната височина могат да се определят съгласно [5] или [6]. В практиката често се прилагат методът на въртящата сфера и методът на защитния ъгъл, които обаче изискват проектирането да става чрез графичен софтуер, например Autocad.

Мълниезащитната зона на прътов мълниеприемник, съгласно методът на защитния ъгъл представлява конус, в който трябва да се вписва изцяло защитаваният обект (фиг. 5). Защитният ъгъл  $\alpha$  се определя в зависимост от избраното ниво на мълниезащита и от височината на мълниеприемника  $h$  (фиг. 6).

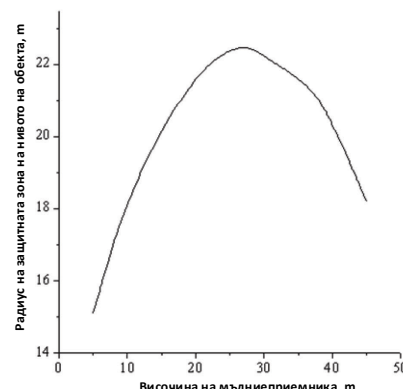
Някои автори оспорват тези два метода, доказвайки, че при височини на монтаж на мълниеприемниците над 20 - 25 m от нивото на земята радиусът на защитна зона на нивото на защитавания обект вместо да нараства започва да намалява, което противоречи на основни закони на физиката (фиг. 7).



**Фиг. 5.** Мълниезащитна зона съгласно методът на защитния ъгъл

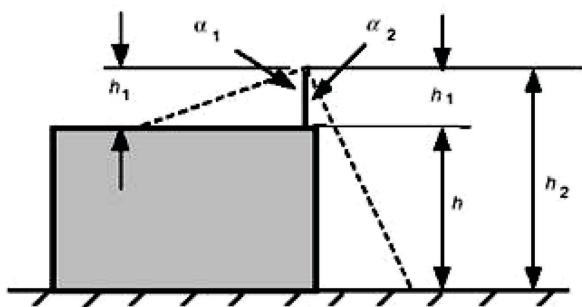


**Фиг. 6.** Мълниезащитна зона съгласно методът на защитния ъгъл



**Фиг. 7.** Зависимост на радиусът на мълние-защитната зона на нивото на защитавания обект от височината на мълниеприемника, съгласно методът на защитния ъгъл.

Друго голямо несъответствие е значителната разлика в защитния ъгъл  $\alpha$  за един и същи обект, но определен за височина на мълниеприемника спрямо най-високата част на обекта  $h_1$  и спрямо нивото на земята  $h_2$  (фиг. 8).

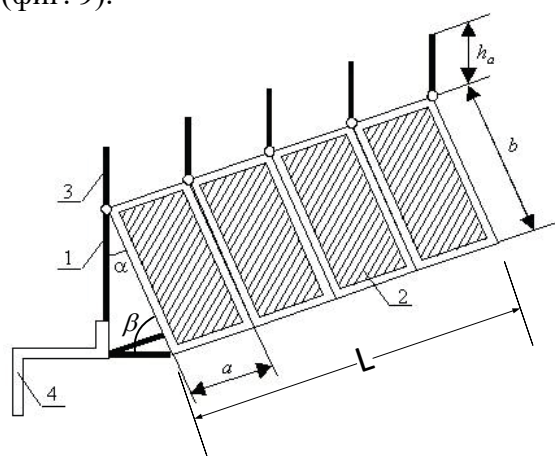


Фиг. 8. Несъответствие на защитния ъгъл в зависимост от нивото според, което се определя височината на мълниеприемника

## ПОДХОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА БРОЯ И РАЗПОЛОЖЕНИЕТО НА МЪЛНИЕПРИЕМНИЦИТЕ ПРИ ФВ СТРИНГОВЕ С ЕДНОСКАТНА И ДВУСКАТНА КОНСТРУКЦИЯ

### ▪ Едноскатна конструкция на ФВ стрингове

При едноскатна конструкция на ФВ стринг е използван подход описан в [10] и модифициран за конкретният случай (фиг. 9).



Фиг. 9. Разположение на ФВ модули и мълниеприемниците върху конструкцията на стринга, където: 1 – конструкция на ФВ стринг; 2 – ФВ модули; 3 – мълниеприемник; 4 – токоотвод.

Мълниезащитата се реализира посредством вертикални мълниеприемници, заварени директно върху металната конструкция.

При мълниезащитна зона тип А (първо ниво на мълниезащита) действителната височина на мълниеприемника над конструкцията  $h_a$  при малка височина на

конструкцията над земята се определя според зависимостта:

$$h_a = \frac{(r_x - 1,6h_x) + \sqrt{2,56h_x^2 + 9,6h_x r_x + r_x^2}}{3,2} \quad (1)$$

където:

$h_x$  – височина на защитаваният обект;

$r_x$  – радиус на защитната зона със височина  $h_x$ ;

$h_a$  – действителна височина на мълниеприемника;

$$h = h_a + h_x \quad (2)$$

При мълниезащитна зона тип Б (второ ниво на мълниезащита) действителната височина на мълниеприемника над конструкцията  $h_a$  може да се пресметне от условието за определяна на радиуса на защитната зона [5]:

$$r_x = 1,5 \left( h - \frac{h_x}{0,92} \right) \quad (3)$$

Като се замести (2) в (3) получаваме израз за пресмятане на действителната височина на мълниеприемника при защитна зона тип Б:

$$h_a = \frac{r_x + 0,13 \cdot h_x}{1,5} \quad (4)$$

И в двата случая, ако дължината на ФВ стринг е  $L$ , то радиусът на защитната зона при равномерно разпределение на мълниеприемниците ще бъде половината от тяхната ширина, т.е.  $r_x = \frac{a}{2}$ .

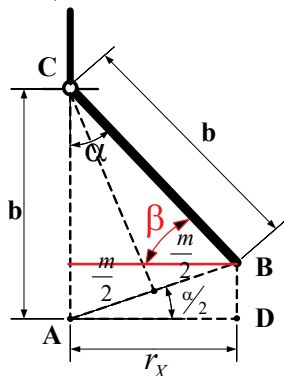
Тъй като PV модулите не са разположени плътно един до друг и за да се осигури припокриване на защитните им зони е необходимо стойността на  $r_x$  да бъде завишена. За целта трябва да вземем предвид дължината на хоризонталната част на конструкцията  $L$ , върху която са разположени модулите и техния брой  $n$ :

$$r_x = \frac{L}{2 \cdot n} \quad (5)$$

В зависимости (1) и (4) към височината на носещата конструкция над земята, трябва да добавим височината на модула:

$$h'_x = h_b + b \quad (6)$$

Фиг. 10 илюстрира минимално-допустимият ъгъл на наклон на ФВ панели спрямо хоризонта  $\beta_{\min}$  за да се гарантира ефективна мълниезащита на модулите, определена със съответното ниво на мълниезащита:



Фиг. 10. Принципна схема на ъгъла на наклон на ФВ модули спрямо хоризонта при едноскатна конструкция.

От триъгълник ABC се определя  $m = 2b \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ , а от триъгълник ABD  $r_x = b \cdot \sin(\alpha) = b \cdot \sin(90 - \beta)$ .

Минимално-допустимият наклон на модулите спрямо хоризонта се определя по:

$$\beta_{\min} = 90 - \arcsin\left(\frac{2 \cdot r_x}{b}\right) \leq \beta_{\text{действ}} \quad (7)$$

където:  $r_x \leq b$

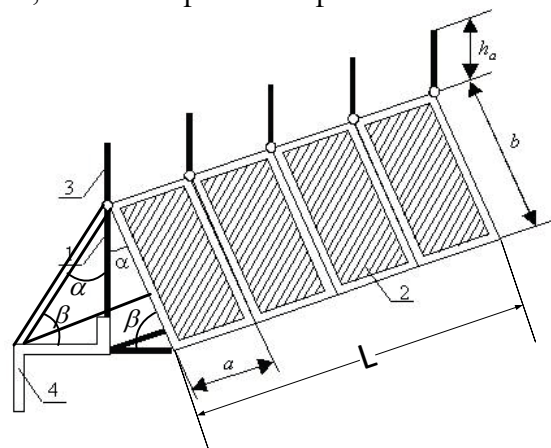
Получената зависимост (7) позволява определянето на минимално-допустимия наклон на модулите спрямо хоризонта за предварително зададен радиус на защитната зона (5).

В случай, че изчислената стойност за  $\beta_{\min}$  е по-голяма от действителния наклон на модулите  $\beta_{\text{действ}}$ , е необходимо допълнително увеличаване на радиуса за защитната зона  $r_x$  и повторение на изчислителната процедура.

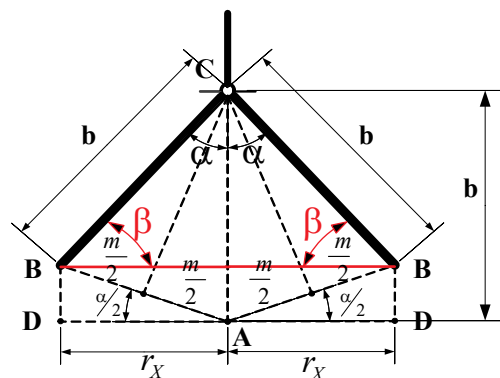
#### ▪ Двускатна конструкция на ФВ стрингове

Поради пълната симетрия на геометрията по вертикалната ос, изчислителни зависимости от (1) до (7) могат да се използват за оразмеряване на мълниеза-

щитната зона и при двускатно разполагане на ФВ модули в отделните стрингове, съгласно фиг. 11 и фиг. 12.



Фиг. 11. Разположение на ФВ модули и мълниеприемниците при двускатна конструкция на стринга



Фиг. 12. Принципна схема на ъгъла на наклон на ФВ модули спрямо хоризонта при двускатна конструкция.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените зависимости и разсъждения могат да се използват в проектантската практика.

Вертикалните мълниеприемници са подходящи за мълниезащита на стрингове от ФВ панели, при монтажът им директно върху металната носещ конструкция. Това позволява монтирането на мълниеприемниците без допълнително укрепване, най-често чрез заваряване.

Монтираните мълниеприемници не оказват значим засенчващ ефект върху ФВ панели поради малката си височина и диаметър.

Предложената методика се основава на изведени аналитични зависимости,

позволяващи да се определят не само геометричните размери на мълние-приемниците, но и да се оцени влиянието на различните ъгли на наклона на ФВ панели спрямо хоризонта.

*Източник на финансиране: проект № 2213Е на ТУ - Габрово.*

*Докладът се публикува във връзка с резултатите от изпълнение на дейностите по проект № 2213Е.*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Economic.bg, The Overgrowth of Renewable Energy Sources(RES) Continues Throughout the Whole Territory of Bulgaria, <https://www.economic.bg/bg/a/view/svryhra-stejyt-na-vei-prodyljava-v-cjala-bylgarija>.
- [2] Capital, The New Renewable Energy Sources – the Boom in Solar Parks, May, 2024.
- [3] DEHN, Lightning Protection Guide, 3-rd updated edition, 2015.
- [4] REGULATION No. 3/2004 for Design of Electrical Power systems and Power lines.
- [5] Regulation No. 4/2010 for Lightning Protection of Buildings, Outdoor Facilities and Open Spaces.
- [6] BDS EN 62305-3:2011 - Lightning protection - Part 3: Protection of construction equipment and people - Annex 5: Lightning protection and surge protection for photovoltaic systems.
- [7] Stefanov, Ern. N., Systems for Protection of PV Parks from Atmospheric and Switching Overvoltages, Energy Review (M), Issue 2, 2012.
- [8] BDS EN IEC 62305-2:2024 Protection against lightning - Part 2: Risk management.
- [9] “AMNIS” LTD, Lightning protection zones. Problems Related with Their Use in Lightning Protection Design, Moscow, 2021// <https://www.amnis.ru/staty/zony-zashchity-molnieotvodov/>
- [10] Petrov, P. K., G. Ts. Velev, K. M. Ivanov., A method for dimensioning the lightning protection of photovoltaic modules, placed on the roofs of buildings, University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, Journal of Mining and Geological Sciences, Vol. 62, Nr. 3, ISSN 2682-9525 (print), ISSN 2683-0027 (online), 2019, pp. 113 – 116;