

УДК 621.316.99:621.311.243(575.2)

А.Б. Асанов¹, А.Б. Бакасова², Н.Т. Ниязов¹

¹КГТУ им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызская Республика

²Институт машиноведения, автоматизации и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики

e-mail: asanov_argen02@mail.ru, bakasovaaina@mail.ru, niiazov54@mail.ru

РАСЧЕТ МОЛНИЕЗАЩИТЫ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В КЫРГЫЗСТАНЕ

Развитие возобновляемой энергетики в Кыргызстане требует комплексного подхода к обеспечению надежности и безопасности солнечных электростанций (СЭС). Одним из ключевых факторов, влияющих на их бесперебойную работу, является защита от грозовых разрядов. В статье рассматриваются особенности молниезащиты солнечных электростанций с учетом климатических условий Кыргызстана, анализируются риски, связанные с поражением оборудования молниями, и предлагаются эффективные методы защиты. Рассмотрены современные технологии молниезащиты, включая внешнюю и внутреннюю защиту, системы заземления, а также применение приборов ограничения перенапряжений.

Ключевые слова: молниезащита, солнечные электростанции, грозовые разряды, выравнивания потенциалов, заземление, защита от перенапряжений, возобновляемая энергетика, Кыргызстан

Цель исследования: разработка и обоснование эффективных методов молниезащиты солнечных электростанций в условиях Кыргызстана с учетом климатических особенностей региона, для повышения их надежности, минимизации риска повреждения оборудования и обеспечения бесперебойного функционирования энергетической инфраструктуры.

Введение. С ростом использования фотоэлектрических электростанций важным аспектом является их защита от природных явлений, включая молнию. Молниезащита имеет решающее значение для безопасности и долговечности фотоэлектрических панелей и солнечных панелей, особенно в различных географических условиях: в горах, на крыше здания, на равнине и на озере.

Фотоэлектрические системы особенно подвержены повреждениям от ударов молнии и скачков напряжения из-за их открытого расположения, большой площади и большого количества электропроводящих компонентов. Поэтому защита от молний и перенапряжений имеет важное значение для обеспечения эксплуатационной безопасности и долговечности оборудования.

Меры молниезащиты включают системы внешней и внутренней защиты. Внешняя молниезащита защищает оборудование от прямых ударов молнии за счет использования улавливающих устройств, отводов и заземляющих устройств, которые надежно отводят ток молнии в землю. Внутренняя молниезащита сводит к минимуму воздействие скачков напряжения внутри установки за счет соблюдения разделительных расстояний, компенсации потенциала молниезащиты и использования устройств защиты от перенапряжений (SPD).

Требования к молниезащите различаются в зависимости от местоположения фотоэлектрической системы. В горных районах, где молния встречается чаще, требуются эффективные системы заземления и более высокие улавливающие сооружения. Отводящие системы должны быть интегрированы в существующую систему заземления здания, в то время как заземлители нуждаются в заземляющих сетях большой площади, чтобы избежать вызванных скачков напряжения. Плавающие солнечные батареи предъявляют особые требования к выбору материалов и использованию воды в качестве проводящего элемента для заземления.

Все защитные меры должны соответствовать международным стандартам, в частности, IEC 62305 (DIN EN 62305) (VDE 0185-305), которые регулируют проектирование, установку и эксплуатацию систем молниезащиты.

Система молниезащиты. Молниезащита означает меры и системы, предназначенные для защиты зданий, сооружений и людей от прямого и косвенного воздействия ударов молнии.

Системы молниезащиты (англ. *Lightning Protection Systems – LPS*) предназначены для защиты сооружений от пожара или механического разрушения.

Состоит из внешней и внутренней молниезащиты.

Функции внешней молниезащиты заключаются в следующем:

- Улавливание прямых попаданий с помощью приспособления для улавливания
- Безопасное рассеивание тока молнии на землю с помощью отводящего устройства
- Распределять ток молнии по земле через систему заземления.

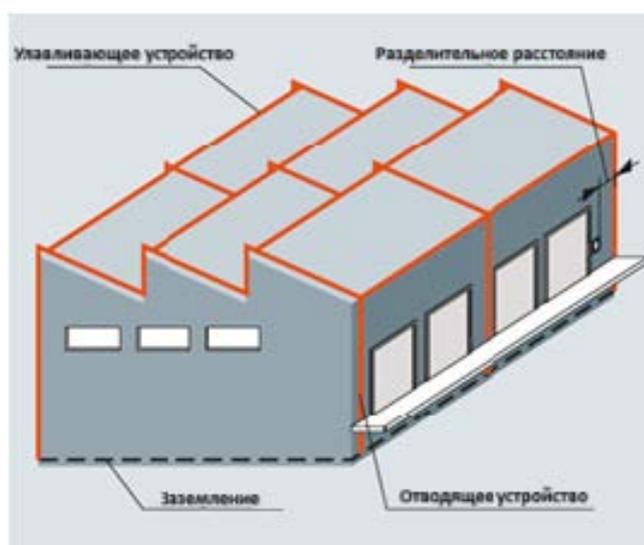


Рисунок 1 – Система молниезащиты – внешняя молниезащита

Функция внутренней молниезащиты заключается в предотвращении образования опасных искр внутри строительной конструкции. Это достигается за счет выравнивания потенциалов или разделительного расстояния между компонентами внешней молниезащиты и электропроводящими элементами внутри конструктивной установки.

Для определения расположения улавливающих устройств можно использовать три метода:

- Метод шаровой молнии
- Сетчатый метод
- Метод защитного угла.

При этом метод молниеносного шара является универсальным методом планирования, рекомендуемым, в частности, для геометрически сложных случаев использования.

Таким образом, существует пропорциональность между значением тока молнии в вершине (в кА) и конечным расстоянием пробоя hB (= радиус сферы молнии R , в м):

$$R = 10 \cdot I^{0,65}, \text{ где } I \text{ – сила тока в вершине пробоя.}$$

Молниезащита зданий описана в стандарте DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1) [2,3]. Этот стандарт определяет среди прочего разделение на отдельные уровни опасности / классы защиты и определяет соответствующие меры молниезащиты. Она различает четыре класса защиты. При этом класс защиты I обеспечивает наивысшую степень защиты, а класс защиты IV – наименьшую по сравнению с ними. Соответствующий класс защиты зависит от эффективности улавливающих устройств, т.е. от того, какая доля ожидаемых ударов молнии

надежно контролируется устройствами для улавливания. Это приводит к конечному расстоянию пробития и, следовательно, к радиусу сферы молнии.

Расследуем метод шаровой молнии [4]. (на рис. 2 показаны зависимости).

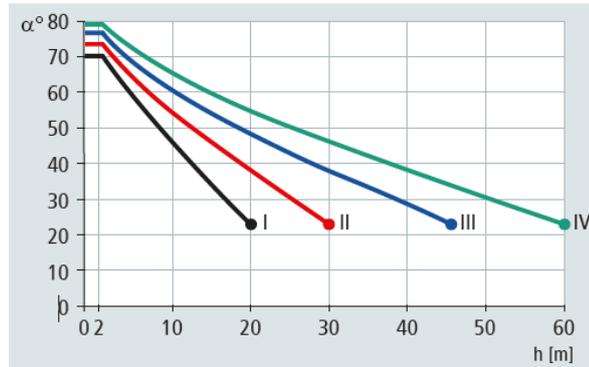


Рисунок 2 – Метод защитного угла в соответствии с DIN EN 62305-3, где α –угол защиты, h – радиус защиты

$$H = R + h - \sqrt{R^2 - \frac{1}{4} \cdot (a^2 + b^2)}, \text{ если } a^2 + b^2 \leq (2 \cdot R)^2.$$

Для $a = b$:

$$H = R + h - \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{2}}, \text{ если } a \leq \sqrt{2} \cdot R$$

- R – радиус шаровой молнии в соответствии с классом молниезащиты (BSK), BSK I 20 m, BSK II 30 m, BSK III 45 m, BSK IV 60 m.
- a, b – минимальное расстояние молниеприемников.
- $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ – диагональное расстояние молниеприемников.
- h – высота солнечной панели.
- H – высота молниеприемника от земли.

Известно, что затенение фотоэлектрических модулей устройствами молниезащиты является важной проблемой, поскольку затенение может значительно снизить эффективность модулей. Чтобы свести это к минимуму, при проектировании внешней системы молниезащиты необходимо принять специальные меры, решением данного вопроса является избегание падение тени на солнечные панели (рис.3). Здесь определяем минимальное расстояние между опорой и опорой улавливающего устройства:

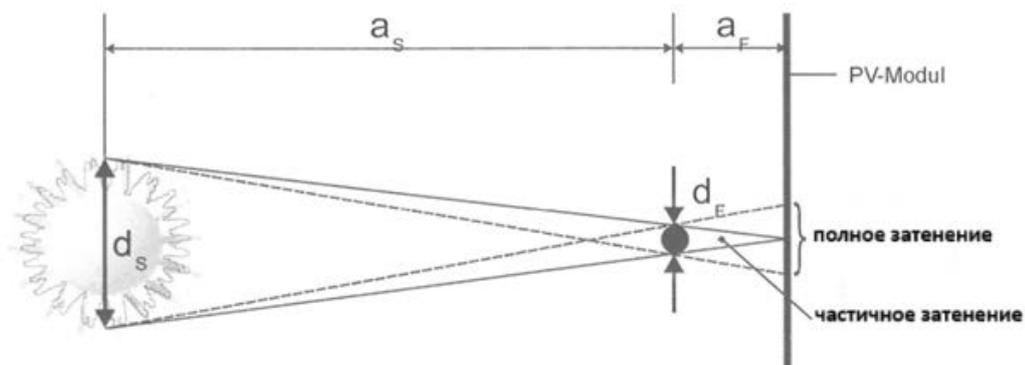


Рисунок 3– Минимальное расстояние между опорой и опорой улавливающего устройства и фотоэлектрического модуля для предотвращения затенения сердечника

$$\frac{a_F}{d_F} = \frac{a_{S-E} + a_F}{d_S} \rightarrow a_F = \frac{a_{S-E} + a_F}{d_S} \cdot d_F \approx \frac{a_{S-E}}{d_S} \cdot d_F \rightarrow a_F[m] = 108 \cdot d_F[m], \text{ где}$$

d_S – диаметр солнца на экваторе $d_S = 1.39 \cdot 10^9 \text{ м}$.

d_F – диаметр молниеприемника $d_F = 8 \text{ мм}, 10 \text{ мм}, 16 \text{ мм}, 20 \text{ мм}$.

a_{S-E} – расстояние от солнца к земле $a_{S-E} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ м}$.

a_F – (миним.) расстояние от молниеприемника до панели.

Итак, учитывая высокогорную местность, следует отметить, что климатические условия в горах сильно отличаются. Частота молнии чаще именно в горной возвышенной местности. Кроме того, состав почвы сильно влияет на удельное сопротивление грунта.

1. Высокогорные фотоэлектрические системы (фотоэлектрические системы) подвергаются повышенному риску удара молнии из-за своего географического положения. Более разреженная атмосфера и более интенсивная напряженность электрического поля делают модули предпочтительным местом воздействия молнии. Поэтому тщательное планирование и создание системы молниезащиты имеют важное значение. Рассматриваем в качестве примера СЭС 1 МВт в г. Бишкек (рис. 4).

Основные данные существующей фотоэлектрической системы

- Пиковая мощность фотоэлектрической системы: **1 МВт**.
- Мощность одного фотоэлектрического модуля: 610 Вт.
- Площадь одного модуля: около 2.8 м².



Рисунок 4 – Вид сверху на солнечную станцию P=1 МВт, в г. Бишкек

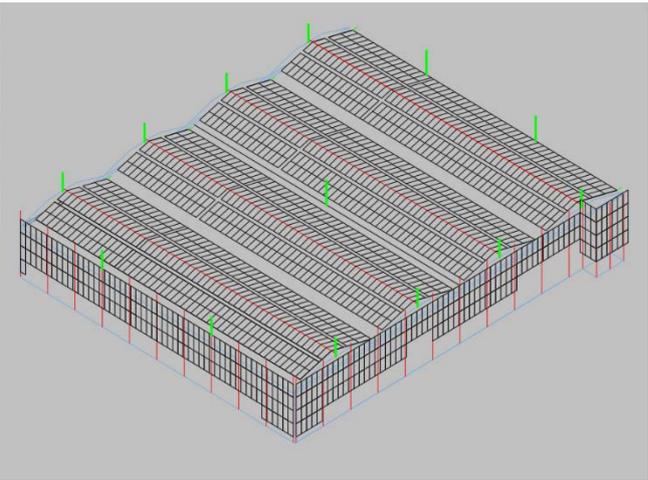


Рисунок 5 – Модель станции с расположением молниеприемников

1 Расчет молниезащиты СЭС 1 МВт

Расчет количества модулей и общей площади:

Для достижения максимальной мощности 1 МВт:

$$\text{Число модулей} = \frac{1000000 \text{ W}}{610 \text{ W}} = 1630 \text{ шт}$$

$$\text{Площадь здания (рис.5)} = 60 * 72 \approx 4320 \text{ м}^2.$$

2. Проектирование отводящих сооружений

Для планирования внешней молниезащиты применяется технология молниеотвода в соответствии с DIN 62305-3. Этот метод определяет зоны защиты с помощью движения виртуальной сферы для определения области защиты. Международные стандарты, такие как IEC 62305 и DIN EN 62305, рекомендуют использовать класс II для следующих типов объектов [2,3]:

- Электростанции средней мощности
- Объекты с повышенным риском грозовой активности

- Объекты, расположенные на открытой местности и на значительной высоте.

Поэтому выбор класса молниезащиты II для высокогорной фотоэлектрической системы мощностью 1 МВт является разумным и соответствует международным требованиям.

Для высокогорных сооружений рекомендуется использовать шкалу BSK II [2,3], которая включает в себя следующие параметры:

- Радиус виртуальной шаровой молнии: 30 м.

- Высота фиксирующих стержней определяется исходя из расстояния между шариком и защищаемой поверхностью.

Улавливающие устройства должны быть расположены таким образом, чтобы:

1) Вся фотоэлектрическая система защищена.

2) Затенение фотоэлектрических модулей сведено к минимуму, чтобы избежать снижения производительности.

3. Расчет высоты, расположения, затенения опор с применением ПО MATLAB (рис. 6), где

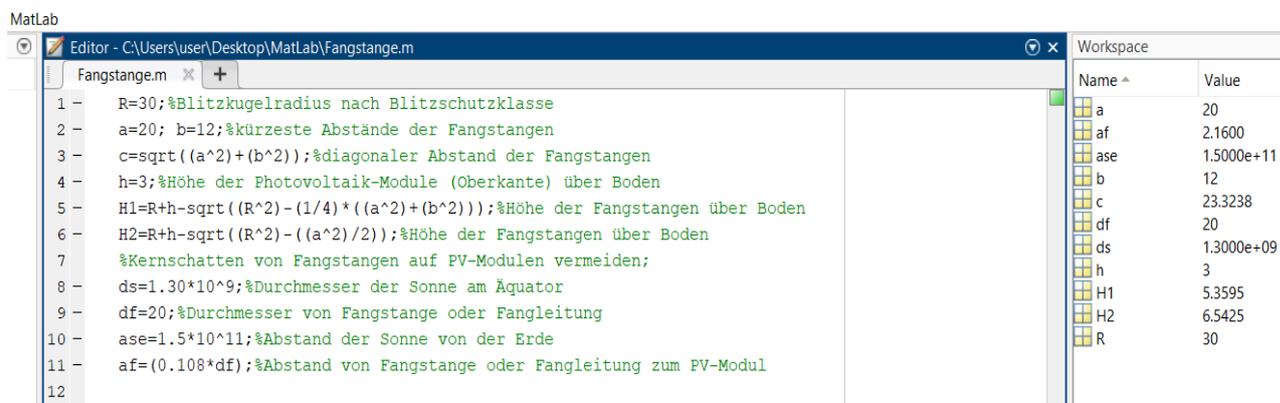


Рисунок 6 – Расчет высоты опор (FS) для фотоэлектрической станции в горах

R – радиус виртуальной шаровой молнии в зависимости от класса молниезащиты,

a,b – расстояние улавливающих устройств,

c – диагональ улавливающих устройств,

h – высшая точка солнечной панели,

H1 – высота улавливающего устройства, если $a \neq b$,

H2 – высота улавливающего устройства, если $a = b$,

Ds – ширина экватора солнца,

Df – сечение улавливающего устройства,

ase – расстояние между солнцем и землей,

af – расстояние улавливающего устройства и солнечной панелию.

4. Выбор устройства крепления для фотоэлектрической системы

Выбираем молниеприемник с возможностью удлинения стержня крепления до 5,5 м; высотой до 9 м с регулируемый.

- Размеры: диаметр Ø40 3000 мм + диаметр Ø22 2500 мм.

Таблица 1 – Результат выбора улавливающих устройств (FS)

Параметры	Единица измерения
Мощность	1 MW
Количество	1630
Площадь	4320 м ²
Высота улавливающих уст.	6,5 м

Расстояние между улавливающими устройствами	20 м x 12 м
Количество улавливающих устройств	13

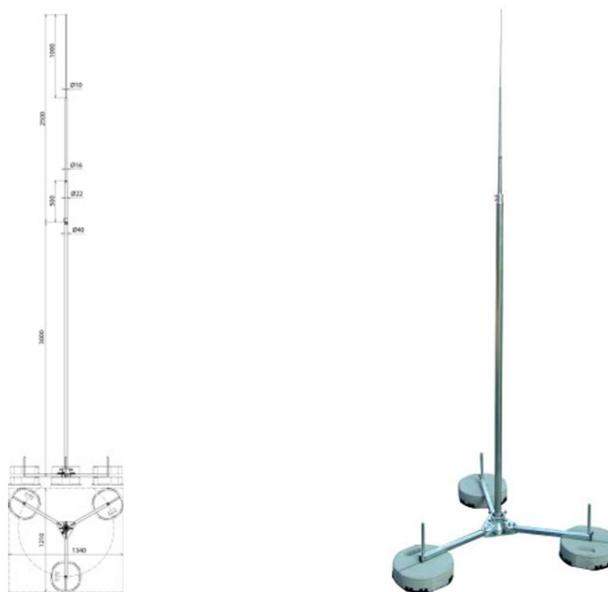


Рисунок 7–Фиксирующие стержни (FS) для фотоэлектрической системы в горах

5. Проектирование системы заземления

Система заземления является центральной частью системы молниезащиты, поскольку она должна надежно отводить ток молнии в землю.

Заземляющая система в виде сетки

- Размер сетки: 20 м × 20 м или 40 м × 40 м.
- Глубина укладки: 0,5 – 1 м в зависимости от почвенных условий.

Заземлитель глубокого заложения

Поскольку в высокогорных районах удельное сопротивление грунта очень велико (до ~ 5000 Ом · м), дополнительно используются глубинные заземлители:

- Материал: медь, нержавеющая сталь или оцинкованная сталь.

Проектирование системы заземления для высокогорных фотоэлектрических систем с высоким удельным сопротивлением грунту.

Удельное сопротивление грунта ρ описывает сопротивление грунта потоку электрического тока. Он измеряется в Ом-метрах ($\Omega \cdot \text{м}$) и сильно зависит от условий почвы (например, влажности, типа породы, температуры).

Типичные значения удельного сопротивления заземления приведены в таблице 2.

Таблица 2– Сопротивление грунта в горной местности.

Вид грунта	Удельное сопротивление ($\Omega \cdot \text{м}$)
Глина	20-100
Песок (сухой)	2000
Каменистая почва (высокогорье)	3000

Для компенсации высокого сопротивления заземления обычно используется комбинация следующих компонентов заземления: сетчатой решетки и глубинного заземлителя.

Интеграция глубинных заземлителей:

Заземлители глубины подключаются к сетчатой сетке в нескольких точках, чтобы обеспечить равномерное распределение и рассеивание электроэнергии.

Целевые значения сопротивления заземления:

Общее сопротивление заземляющей системы зависит от комбинации горизонтального и вертикального заземления.

- Низкочастотное сопротивление заземления (например, для молниезащиты): целевое значение $< 10 \text{ Ом}$.

- В грунтах с высоким удельным сопротивлением для достижения этого целевого значения могут быть приняты следующие меры:

- Увеличение количества глубинных заземлителей.

- Использование проводящих наполнителей, таких как бентонит, для снижения контактного сопротивления.

- Параллельное подключение нескольких заземлителей для уменьшения общего сопротивления.

Модельная задача:

Задано:

$D = 0,01 \text{ м}$ – прямоугольная сетка из проводов диаметром, общим размером

$a \times b = 220 \text{ м} \times 100 \text{ м}$ с размером ячейки $w = 20 \text{ м}$,

$d = 0,5 \text{ м}$ – заглубление на глубину,

$n = 55$ количество вертикальных стержней (заземлителей глубины в каждой точке пересечения) длиной

$l = 9 \text{ м}$ – длина глубинных заземлителей, расположенных в земле,

$\rho = 3000 \text{ }\Omega \cdot \text{м}$ удельное сопротивление земли.

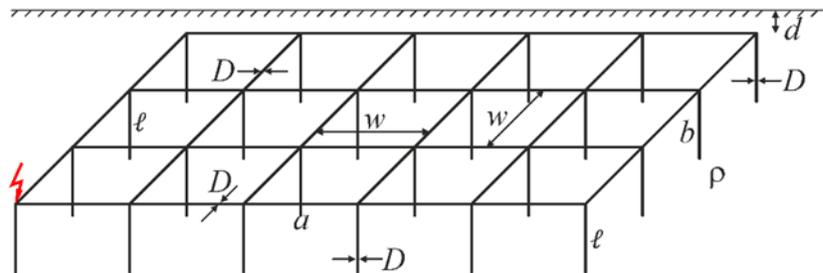


Рисунок 7 – Заземляющее устройство в горах

Расчет проверен ПО МАТЛАБ:

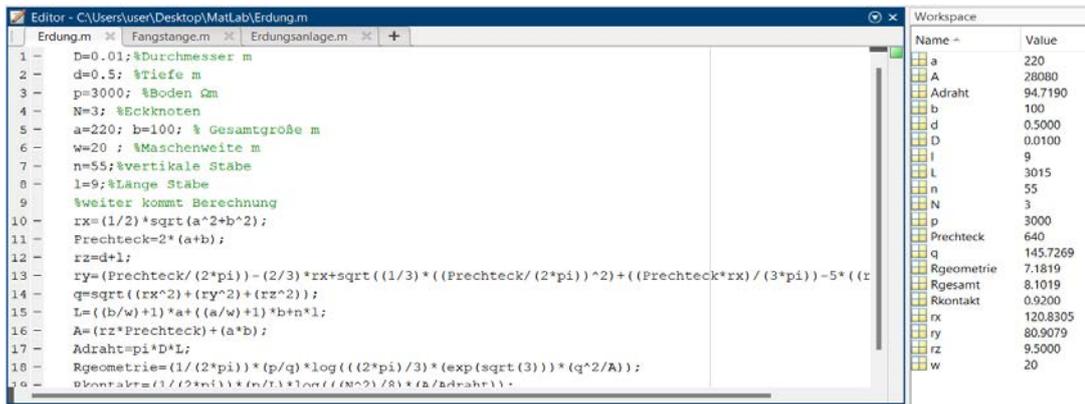


Рисунок 8 – Расчет заземления в ПО МАТЛАБ

$$r_x = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{a^2 + b^2} = 120,83 \text{ m}, \quad P_{\text{Rechteck}} = 2 \cdot (a + b) = 640 \text{ m}, \quad r_z = d + l = 9.5 \text{ m}$$

$$r_y = \frac{P_{\text{Rechteck}}}{2\pi} - \frac{2}{3} \cdot r_x + \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{P_{\text{Rechteck}}}{2\pi}\right)^2 + \frac{P_{\text{Rechteck}} \cdot r_x}{3\pi} - 5 \cdot \left(\frac{r_x}{3}\right)^2} = 80,91 \text{ m}$$

$$g = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} = 145,73 \text{ m}$$

$$L = \left(\frac{b}{w} + 1\right) \cdot a + \left(\frac{a}{w} + 1\right) \cdot b + n \cdot l = 2 \cdot \frac{a \cdot b}{w} + a + b + 28 \cdot l = 3015 \text{ m}$$

$$A = r_z \cdot P_{\text{Rechteck}} + a \cdot b = 28080 \text{ m}^2 \quad A_{\text{Draht}} = \pi \cdot D \cdot L = 94,7 \text{ m}^2$$

$N = 3$ (Blitzstromeinspeisung an Eckknoten)

$$R_{\text{Geometrie}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\rho}{g} \cdot \ln\left(\frac{2\pi}{3} \cdot e^{\sqrt{3}} \cdot \frac{g^2}{A}\right) = 7,18 \Omega$$

$$R_{\text{Kontakt}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\rho}{L} \cdot \ln\left(\frac{N^2}{8} \cdot \frac{A}{A_{\text{Draht}}}\right) = 0,92 \Omega$$

$$\rightarrow R_{\text{Gesamt}} = R_{\text{Geometrie}} + R_{\text{Kontakt}} = 7,18 \Omega + 0,92 \Omega = 8,1 \Omega, \text{ где}$$

r_x, r_z, r_y – длина заземлителей по оси,

L – общая длина заземлителей,

g – общая длина заземлителя по осям,

P – периметр,

R – сопротивление.

Таблица 3– Результат расчета сопротивления грунта в горах

Параметры	Единица измерения
Удельное сопротивление	Очень высокая (3000 $\Omega \cdot \text{m}$)
Главное заземляющее устройство	Сетка из меди или стали
Сетка	20 m x 20 m
Вертикальные заземлители	9 m вертикального заземлителя
Соединение	Антикоррозийное соединение улавливающего устройства с сеткой
Сопротивление заземляющего устройства	8,1 Ω (< 10 Ω)

Сочетание этих мер позволяет построить надежную систему заземления для высокогорной фотоэлектрической системы даже в высоких сопротивлениях грунта. Это обеспечивает надежную молниезащиту и эффективное рассеивание перенапряжений. Моделируемая станция мощностью 1 МВт в г. Бишкек построена на существующем здании, разрешается заземляющее устройство подключить уже к существующему заземлению здания при условии, что сопротивление заземляющего устройства не превышает установленной нормы.

Заключение

Молниезащита играет решающую роль в обеспечении безопасности, долговечности и эффективного использования этих установок. Проведен анализ нормативных требований и международного опыта в данной сфере. Предложенные меры молниезащиты позволят повысить надежность работы СЭС и минимизировать вероятность повреждения оборудования, что способствует устойчивому развитию солнечной энергетики в регионе. В работе проведен анализ мер молниезащиты фотоэлектрической станции (фотоэлектрических систем) в горных географических регионах Кыргызстана. Рассмотрены особенности молниезащиты солнечных электростанций с учетом климатических условий Кыргызстана и предложены эффективные методы защиты. Рассмотрены современные технологии молниезащиты, включая внешнюю и внутреннюю защиту, системы заземления.

Литература

1. P. Hasse, J. Wiesinger und W. Zischank, Handbuch für Blitzschutz und Erdung, München: 5, 2006.
2. DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1): 2022, *Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze*.
3. DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) Beiblatt 5: 2014, *Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen – Beiblatt 5: Blitz- und Überspannungsschutz für PV-Stromversorgungssysteme*.
4. Wikipedia, „Photovoltaikanlage,“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaikanlage>.
5. New-Tek LLC, „Solarstation auf dem Berg, Höhe 3400 m über dem Meeresspiegel,“ [Online]. Available: <https://newtek-schmid.com/projects/31>.
6. DEHN SE, Blitzplaner, Neumarkt, 2018.
7. Zandz, „Blitzschutz für Privathäuser,“ [Online]. Available: https://zandz.com/ru/molniezashchita_doma/.
8. Zandz, „Blitzschutz in Kirgisistan,“ [Online]. Available: <https://zandz.com/ru/biblioteka/molniezashchita-v-kyrgyzstane-pokoryajte-vershiny-tolko-s-provodnikom/>.
9. H. Häberlin, Photovoltaik: Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen, VDE, 2010.
10. Wikipedia, „Liste von Solarkraftwerken in Deutschland,“ [Online]. Available: https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Solarkraftwerken_in_Deutschland.
11. DEHN SE, „Fangstangen / Fangspitzen, Zubehör,“ [Online]. Available: <https://www.dehn.de/de-DE/store/category/C3474WebdeDE/fangstangen-fangspitzen-zubehoer-f15da68f82b3829e3796>.
12. W. A. Chisholm, „Capacitance and Resistance Duality, applied to Lightning Backflashover Estimation,“ in *ICHVE 2022, IEEE DEIS Caixin Sun and Stan Gryzbowski Award Lecture, 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, September 25-29, Chongqing, China, 2022*.
13. W. A. Chisholm, „Evaluation of Simple Models for the Resistance of Solid and Wire-Frame Electrodes,“ *IEEE Transactions on Industry Applications*, Bd. 51, Nr. 6, pp. 5123-5129, 2015.

14. W. A. Chisholm und W. Janischewskyj, „Lightning Surge Response of Ground Electrodes,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, Bd. 4, Nr. 2, pp. 1329-1337, 1989.
15. W. A. Chisholm, E. Petrache und F. Bologna, „Grounding of Overhead Transmission Lines for Improved Lightning Protection,“ in *IEEE Transmission and Distribution Conference*, Chicago, IL, USA, 2010.
16. Калматов У.А. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. – Бишкек, КГТУ, Кыргызстан.