



SOLAR PHOTOVOLTAIC AND THERMOCOLLECTORY STATIONS ON MOBILE PLATFORMS (TRACKING SYSTEM), PLACED ON A LIMITED AREA

Oleg CHEALBASH, Eugene KUZNETSOV

Institute of Mathematics and Computer Science, Academy of Sciences of Moldova

Abstract – The content of the work is the development of photovoltaic power plants design program on limited grounds (integrated in building). The problem is that the energy efficiency of such plants depends on many factors, among which the most significant is the shading of the surface. The program allows you to receive real-time solutions for different variants of initial conditions.

The main type of power plants under consideration is tracking systems, involves placing panels on movable two-coordinate platforms. The main conclusion of the completed work consisted in the fact that two-coordinate systems essentially are not able to eliminate the formation of shadows on the surface of the panels. Therefore it was appeared the idea of creating three-coordinate platforms that can solve this problem. But the modification of the kinematic circuit of the platform (giving it the third degree of freedom for horizontal movement) was only one part of the problem. The main problem was the development of mathematical algorithms to ensure optimal positioning of the platforms. The problem has been solved, as well as a research sample has been constructed [1].

Thus, it becomes possible to increase the amount of power supplied from the utility unit area (the coefficient of "energy density pickoff").

Keywords - photovoltaic power plants, shading of the surface, two-coordinate systems.

STAȚII SOLARE FOTOVOLTAICE ȘI TERMOCOLEKTORI PE PLATFORME MOBILE (TRACKING SYSTEM), CARE ARE LOC PE O ARIE LIMITATĂ

Oleg CEALBAȘ, Eugene CUZNEȚOV

Institutul de Matematică și Informatică, Academia de Științe a Moldovei

Rezumat - Conținutul lucrării - dezvoltarea programei de proiectare a centralelor electrice fotovoltaice pe suprafețe limitate (integrate în clădire). Problema este că eficiența energetică a acestor centrale depinde de mai mulți factori, printre care cea mai importantă este umbrirea suprafeței panourilor solare, care are loc atunci când ele sunt plasate în rânduri. Programul vă permite să primim soluții în timp real pentru condițiile inițiale diferite.

Tipul principal de centrale electrice în cauză - sisteme de urmărire (tracking system), ce presupune amplasarea panourilor pe platforme mobile cu două coordonate. Concluzia principală a lucrării finalizate a constat în faptul, că sistemul cu două coordonate, în principiu, nu sunt în măsură să elimine formarea de umbre pe suprafața panourilor. Prin urmare a apărut ideea de a crea platforme cu trei coordonate care poate rezolva această problemă. Dar modificarea platformei circuitului cinematic (oferindu-i al treilea grad de libertate de mișcare pe orizontală) a fost doar o parte a problemei. Principala problemă a fost dezvoltarea unor algoritmi matematici pentru a asigura optimalitatea de poziționare a platformelor. Problema a fost rezolvată, precum și la stabilirea unui eșantion de cercetare [1].

Astfel, devine posibil să se mărească cantitatea de energie furnizată de la unitatea de suprafață de utilitate (coeficientul "energy density pickoff").

Cuvinte cheie – stații fotovoltaice, umbrirea suprafeței, sisteme cu două coordonate.

СОЛНЕЧНЫЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕРМОКОЛЛЕКТОРНЫЕ СТАНЦИИ НА ПОДВИЖНЫХ ПЛАТФОРМАХ (TRACKING SYSTEM), РАЗМЕЩАЕМЫЕ НА ОГРАНИЧЕННЫХ ПЛОЩАДКАХ

Чалбаш О.Х., Кузнецов Е.А.

Институт Математики и Информатики, Академия Наук Молдовы

Реферат - Содержание работы – разработка программы проектирования фотоэлектрических станций на ограниченных площадках (integrated in building). Проблема в том, что энергетическая эффективность таких станций зависит от множества факторов, среди которых наиболее существенным является затенение поверхности солнечных панелей, возникающее при их размещении в ряды. Программа позволяет в режиме реального времени получать решения для различных вариантов начальных условий.

Основной тип рассматриваемых энергетических установок – следящие системы (*tracking system*), предполагающие размещение панелей на подвижных двухкоординатных платформах. Основной вывод завершённой работы состоял в том, что двухкоординатные системы в принципе не способны исключить образование теней на поверхности панелей. Поэтому возникла идея создания трехкоординатных платформ, способных разрешить эту проблему. Но модификация кинематической схемы платформы (придание ей третьей степени свободы для горизонтальных перемещений) была лишь частью задачи. Главная проблема состояла в разработке математических алгоритмов, обеспечивающих оптимальное позиционирование платформ. Проблема была решена, а также создан опытно-экспериментальный образец [1].

Таким образом, возникает возможность увеличения объема энергии, получаемого с единицы полезной площади (коэффициент «плотности съема энергии»).

Ключевые слова - фотоэлектрические станции, затенение поверхности, двухкоординатные системы.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа касается возможности размещения небольших солнечных энергетических установок (фотоэлектрических станций мощностью от 8 до 150 кВт) на крышах производственных и жилых зданий. Например, на плоских крышах лифтовых шахт жилых зданий, крышах различного рода производственных модулей и др.

Необходимыми условиями являются наличие прочных перекрытий и отсутствие на близком расстоянии экранирующих свет объектов в секторе азимутальных углов солнечной эклиптики.

Прецедентная практика размещения на крышах зданий солнечных энергетических установок существует во многих странах мира, в особенности в Германии (государственная программа «миллион крыш»). Более того, в ряде стран, строительные подрядчики, устанавливающие энергетических установки на базе возобновляемых источников, получают различные дотационные преференции от государства.

Нетрудно видеть, что при относительно небольших затратах объекты, снабженные автономными энергетическими установками имеют конкурентные преимущества, благодаря значительной привлекательности для заказчиков и клиентов.

Владельцы таких объектов могут обеспечивать себя (в полной мере или частично) электрической энергией или продавать ее электрической компании и получать определенный доход. В Молдове уже существует законодательная основа и прецедентная практика продажи электроэнергии частными и юридическими лицами электрическим компаниям.

Необходимо отметить, что имеет место ряд специфических факторов, сдерживающих развитие этого направления.

Во-первых, низкие закупочные цены на электроэнергию, производимую на основе возобновляемых источников – порядка 0.10 - 0.11\$/кВт-час. Например, в Канаде закупочная цена составляет 0.20\$/кВт-час, а в ряде стран Европы достигает 0.25 – 0.30\$/кВт-час.

Вследствие этого используют относительно дешевые и низкоэффективные стационарные установки. В среднем эффективность таких установок на 40 – 45% ниже, чем у станций на базе двух координатных платформ (*tracking system*).

Двух координатные платформы европейских компаний (например, *MecaSolar*, *DegerEnergy*) достаточно дорогие – от 160 - 200 евро/кв.м. Подвижная платформа, несущая 12 – 13 кв.м. панелей

может стоить более 2000 евро (без системы управления).

Однако, такие подвижные платформы отличаются достаточно простой механической частью, которые легко изготовить. Проблематичным является воспроизведение систем управления.

Опыт проектирования энергетических установок показывает, что станции на базе двух координатных платформ также не избавляют в полной мере от потерь энергии вследствие неизбежного образования теней на поверхности панелей. Множество экспертов сходятся во мнении, что затенение 10% поверхности в лучшем случае приводит к 20% потере эффективности, а при определенных обстоятельствах эта цифра доходит до 50% [2].

Единственным способом смягчения влияния данного негативного фактора является дистанционирование платформ при их рядном размещении. По существующим нормативам дистанции устанавливаются таким образом, чтобы площадь затенения не превышала 3-4%. При этом, расстояния между осями платформ в зависимости от широты, достигают 2.5 – 4 габаритных размеров панелей, а коэффициент плотности размещения составляет не более – 0.2 (отношение площади панелей к площади участка). Но тогда снижается показатель плотности «съема» энергии с единицы площади участка. Иначе, для физически ограниченных площадок возникает некоторый лимит на объем вырабатываемой энергии. Разумеется, можно укрупнять платформы. Но, такая тенденция ограничена величиной концентрированной нагрузки на перекрытия крыш. Из известных применяемых систем *«integrated in building»* максимальные размеры имеют платформы, несущие до 40 кв.м. панелей мощностью 7 кВт и весом 1000 кг (без мачты) [3].

Поэтому исходная техническая задача уменьшения затенения панелей была математически формализована в виде оптимизационной задачи минимизации площади тени.

При малом количестве рядов размещения платформ (<3) или малом количестве платформ в одном ряду (<4) эта задача допускает аналитическое решение, дающее на выходе различные оптимальные наборы азимутальных углов и углов склонения панелей к горизонту. При увеличении этих величин резко возрастает сложность аналитического решения из-за роста сложности аналитического выражения функции площади незатененной поверхности. Количество рядов на стандартной площадке размещения платформ (крыша здания) и не может быть большим (обычно <4), а вот количество

платформ в одном ряду может расти. Интуитивно ясно, что есть некоторое оптимальное количество панелей в одном ряду (6-7) такое, что дальнейшее увеличение их количества будет очень мало влиять (< 1%) на увеличение незатененной площади панелей («насыщение» величины площади съема энергии с панелей).

В неаналитическом случае для решения задачи был составлен программный алгоритм нахождения оптимальных решений поставленной задачи с использованием метода роста градиента функции незатененной площади при приближении к оптимальному решению.

Были спроектированы трех координатные платформы, позволяющие без превышения норматива затенения размещать аналогичные станции (по мощности, числу платформ и площади панелей) на участках меньшей площади - от 2.5 до 3 раз. Или, что, то же самое, увеличивать число платформ на данном участке и, получать больше энергии на 40-50%.

Был также разработан экспериментальный образец такой подвижной платформы, и изготовлена бортовая система управления. Назначение – тестирование работы трех координатной кинематической схемы и отладка оптимизирующей программы управления. При этом, механика и принципиальная схема управления не претерпели особых изменений. Исключение составляет лишь оптимизирующая программа управления по третьей координате – предмет «Know-How». Удорожание платформы в пределах 18-20%, главным образом за счет увеличения числа стандартных исполнительных механизмов и датчиков движения. На сайте <http://bluebox-labs.com> представлены некоторые материалы и видео ролик, демонстрирующий работу трех координатной системы.

Ниже приведены результаты сравнительного технико-экономического анализа различных типов солнечных энергетических станций, установленных на физически ограниченной площадке (условный пример).

1. Двухкоординатные платформы (нормативное размещение)

Расчеты осуществляются для площадки фиксированных размеров 18x15.6 метра площадью 280.8 кв.м. Первоначально размеры и ориентация площадки подобраны таким образом, чтобы обеспечивать нормативные дистанции между платформами. В свою очередь, нормативные дистанции должны обеспечивать величину среднегодовой площади затенения поверхности панелей на уровне 3-4%. В результате вариантных расчетов установлены оптимальные параметры проекта (оптимальное число 2-х координатных платформ - 7, число рядов - 3, способ размещения в рядах - шахматный, дистанции и др. параметры).

Расчет объема производства электроэнергии на базе 7 двухкоординатных платформ

Таблица 1.1

№	Название параметра	Значение параметра
1	2	3
1	Число солнечных дней в году (дн)	200
2	Средняя продолжительность светового дня (час)	10
3	Номинальный среднегодовой объем выработки энергии (кВт-час)	19600
4	Фактический среднегодовой объем выработки энергии (кВт-час)	18002.80
5	Фактический объем выработки энергии за период эксплуатации (кВт-час)	450070
6	Стоимость фактического годового объема выработанной электроэнергии (\$)	1980.31
7	Стоимость электроэнергии выработанной за период эксплуатации (\$)	49507.7
8	Срок окупаемости станции (лет)	6.56
9	Рентабельность за период эксплуатации (%)	380.83

*) $k_{тн} = 0.91851$ – коэффициент потерь энергии вследствие затенения. Вычисляется по формуле $k_{тн} = (1 - (1 - (k_{эф}/100)) \times 2)$. Где $k_{эф}$ – обозначает удельную площадь затенения панели в %. Принимается в зависимости от среднегодовой эффективности по тени (см. таблицу 1.3).

Расчет эффективности по тени двухкоординатных платформ.

Таблица 1.2

№ мес.	Дата	Широта	Коэфф. плотн.	Эффект. коэфф (%)
1	2	3	4	5
1	1/21/2015	47	0.199	82.226
2	2/21/2015	47	0.199	89.253
3	3/21/2015	47	0.199	94.104
4	4/21/2015	47	0.199	97.912
5	5/21/2015	47	0.199	98.287
6	6/21/2015	47	0.199	96.271
7	7/21/2015	47	0.199	98.316
8	8/21/2015	47	0.199	98.053
9	9/21/2015	47	0.199	93.708
10	10/21/2015	47	0.199	88.954
11	11/21/2015	47	0.199	82.368
12	12/21/2015	47	0.199	82.76
	Ср. годов.			91.851

2. Трехкоординатные платформы (компактное размещение)

Расчеты осуществляются для 3-х координатных платформ. Как показывают результаты вычислений, применение таких платформ позволяет

существенно сократить дистанции между ними (с 9 м до 5 м по оси «North - South» и с 7.8 м до 4.4 м по оси «West - East») без ущерба нормативу затенения. Таким образом, возникает возможность разместить на данном участке дополнительно еще, по крайней мере, три платформы и повысить номинальную мощность станции до 28000 кВт, т.е. на 42.86%.

Из сопоставления данных таблиц 1.1 и 2.1 видно, что увеличение стоимости станции на базе трех координат платформ не превышает 13.28% $((13220-11670)/11670) \times 100 = 13.28$). Но стоимость одной платформы возрастает на 22.73% $((810 - 660)/750 = 0.2273)$.

Расчет объема производства электроэнергии на базе 7 трехкоординатных платформ

Предварительный анализ данных таблиц 1.1 и 2.1 показывает, что применение трех координатных платформ сопряжено с несколько худшими технико-экономическими показателями – уровень рентабельности ниже на 7.08%, а срок окупаемости возрастает на полгода. При этом, объем выработанной электроэнергии возрастает на 7.21%.

Расчет объема производства электроэнергии на базе 7 трехкоординатных платформ

Таблица 2.1

№	Название параметра	Значение параметра
1	2	3
1	Число солнечных дней в году (дн)	200
2	Средняя продолжительность светового дня (час)	10
3	Номинальный среднегодовой объем выработки энергии (кВт-час)	19600
4	Фактический среднегодовой объем выработки энергии (кВт-час)	19301.49
5	Фактический объем выработки энергии за период эксплуатации (кВт-час)	482537.3
6	Стоимость фактического годового объема выработанной электроэнергии (\$)	2123.16
7	Стоимость электроэнергии выработанной за период эксплуатации (\$)	53079.1
8	Срок окупаемости станции (лет)	7.06
9	Рентабельность за период эксплуатации (%)	353.86

*) $k_{тн} = 0.98477$ – коэффициент потерь энергии вследствие затенения. Вычисляется по формуле $k_{тн} = (1 - (k_{эф}/100)) \times 2$. Где $k_{эф}$ – обозначает удельную площадь затенения панели в %. Принимается в зависимости от среднегодовой эффективности по тени (см. таблицу 2.2).

Но главное преимущество состоит в том, что незначительно превышающий объем энергии получается с участка, имеющего в 2.34 раза меньшую площадь. Это означает, что на заданном (физически ограниченном) участке можно разместить, по крайней

мере, еще три платформы, увеличив номинальную мощность станции на 42.86%.

Расчет эффективности по тени для 7 трехкоординатных платформ

Таблица 2.2

№ мес.	Дата	Широта	Коэфф. плотн.	Эффект. коэфф (%)
1	2	3	4	5
1	1/21/2015	47	0.467	96.244
2	2/21/2015	47	0.467	97.846
3	3/21/2015	47	0.467	99.373
4	4/21/2015	47	0.467	99.716
5	5/21/2015	47	0.467	99.796
6	6/21/2015	47	0.467	99.445
7	7/21/2015	47	0.467	99.798
8	8/21/2015	47	0.467	99.722
9	9/21/2015	47	0.467	99.398
10	10/21/2015	47	0.467	97.773
11	11/21/2015	47	0.467	96.219
12	12/21/2015	47	0.467	96.390
	Ср. годов.			98.477

Потери энергии от затенения – 1.523% (при условии, что 10% затенения обуславливают, как минимум, 20% потерь энергии).

3. Двухкоординатные платформы (компактное размещение)

В качестве примера для сравнительного анализа рассматривается ситуация, в которой 7 2-х координатных платформ размещаются также компактно, как и 3-х координатные платформы в предыдущем примере.

Расчет объема производства электроэнергии на базе 7 двухкоординатных платформ

Таблица 3.1

№	Название параметра	Знач. парам.
1	2	3
1	Число солнечных дней в году (дн)	200
2	Средняя продолжительность светового дня (час)	10
3	Номинальный среднегодовой объем выработки энергии (кВт-час)	19600
4	Фактический среднегодовой объем выработки энергии (кВт-час)	15840.52
5	Фактический объем выработки энергии за период эксплуатации (кВт-час)	396013
6	Стоимость фактического годового объема выработанной электроэнергии (\$)	1742.46
7	Стоимость электроэнергии выработанной за период эксплуатации (\$)	43561.43
8	Срок окупаемости станции (лет)	7.46
9	Рентабельность за период эксплуатации (%)	335.09

*) $k_{тн} = 0.80819$ – коэффициент потерь энергии вследствие затенения. Вычисляется по формуле $k_{тн} = (1 - (1 - (k_{эф}/100)) \times 2)$. Где $k_{эф}$ – обозначает удельную площадь затенения панели в %. Принимается в зависимости от среднегодовой эффективности по тени (см. таблицу 3.2).

Предварительный анализ данных таблиц 2.2 и 3.2 показывает, что компактное размещение двух координатных панелей (аналогичное размещению трех координатных платформ) отличается худшими технико-экономическими показателями. В частности, объем производства электроэнергии падает на 21.85%, срок окупаемости возрастает (на один год), рентабельность снижается на 5.6%. Единственным фактором, обусловившим такое снижение, является более интенсивное образование теней при компактном размещении платформ.

Расчет эффективности по тени для 7 двухкоординатных платформ

Таблица 3.2

№ мес.	Дата	Широта	Коэфф. плотн.	Эффект. коэфф (%)
1	2	3	4	5
1	1/21/2015	47	0.467	66.892
2	2/21/2015	47	0.467	75.929
3	3/21/2015	47	0.467	84.097
4	4/21/2015	47	0.467	89.303
5	5/21/2015	47	0.467	90.888
6	6/21/2015	47	0.467	90.043
7	7/21/2015	47	0.467	90.970
8	8/21/2015	47	0.467	89.469
9	9/21/2015	47	0.467	83.815
10	10/21/2015	47	0.467	75.400
11	11/21/2015	47	0.467	66.934
12	12/21/2015	47	0.467	66.087
	Ср. годов.			80.819

Потери энергии от затенения – 19.181% (при условии, что 10% затенения обуславливают, как минимум, 20% потерь энергии).

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

В таблице 4 приведенные обобщенные показатели всех, выше рассмотренных типов энергетических установок (см. таблицы 1.2, 2.2 и 3.2).

Сопоставительный анализ данных показывает, что наилучшие экономические показатели у системы двух координатных платформ, размещенных на нормативных дистанциях. Несколько худшие экономические показатели у системы трех координатных платформ. Но объем выработки энергии и, соответственно, коэффициент съема энергии с единицы полезной площади значительно выше (пп. 1 и 8). При компактном размещении системы двух координатных платформ экономические показатели существенно снижаются по сравнению с первыми двумя вариантами. Объем выработанной энергии и коэффициент плотности

выше, чем у первого варианта, но существенно ниже, чем у второго.

Таблица 4

№	Название показателя	2-х коорд. (нормативно)	3-х коорд. (компактно)	2-х коорд. (компактно)
1	2	3	4	5
1	Фактический объем выработки энергии за период эксплуатации (кВт-час)	450070	482537.3	396013
2	Стоимость электроэнергии выработанной за период эксплуатации (\$)	49507.7	53079.1	43561.43
3	Срок окупаемости станции (лет)	6.56	7.06	7.46
4	Рентабельность (%)	380.83	353.86	335.09
5	Первоначальные капиталовложения (\$)	13000	15000	13000
6	Эксплуатационные расходы (\$/год)	200	250	200
7	Площадь участка (кв.м)	280.8	120	120
8	Коэффициент плотности «съема» энергии (кВт/кв.м)	64.11	160.85	132.00

Авторы



Чалбаш Олег Халильевич.

Дата рождения: 09.10.1952 г.

Николаевский кораблестроительный институт им. адмирала С.О.Макарова. Николаев, (1969-1975 гг.). Факультет – машино-строительный.

Очная аспирантура ВНИИ Системных исследований при АН СССР и ГКНТ СССР. Москва, 1981-1983 гг. Специальность –

математические методы управления и планирования. Доктор экономических наук.



Кузнецов Евгений Александрович.

Дата рождения: 24.08.1964 г.

Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова. Москва, (1981-1986 гг.), факультет – механико-математический. Очная аспирантура – там же. Специальность – алгебра, логика и теория чисел.

Доктор физико-математических наук

ЛИТЕРАТУРА

1. Проект трех координатной системы. <http://bluebox-labs.com>.
2. Раушенбах Г. «Справочник по проектированию солнечных батарей». М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
3. Проект компании DEGERenergie GmbH & Co. KG <http://www.degerenergie.de/en/>.
4. Р. I. Cooper «The absorption of radiation in solar stills». Solar Energy 12, pp. 333-346., 1969.
5. Э.В.Кононович, В.И.Мороз «Общий курс астрономии». Учебное пособие / Под ред. В. В. Иванова. — Едиториал УРСС, Москва, 2001 г.
6. А. Д. Обозов, Р. М. Ботпаев. «Возобновляемые источники энергии». Учебное пособие для вузов. Бишкек. 2010 г.
7. Проект «Aura Solar Is». <http://www.aurasolar.com.mx/>.
8. ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Перспективные технологии и технические решения в области солнечной энергетики. <http://pvlab.ioffe.ru>.