

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Еремин Денис Иванович

магистр экономических наук, заведующий лабораторией системных исследований космической деятельности

Понятов Юрий Александрович

заместитель заведующего лабораторией системных исследований космической деятельности

Кемешева Динара Галимжановна

магистр технических наук, инженер–электроник

Институт космической техники и технологии

г. Алматы, Республика Казахстан

ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА РАЗМЕЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Аннотация: в статье рассматриваются основные угловые параметры, определяющие положение Солнца относительно Земли. Были выявлены и рассмотрены 3 варианта размещения подвижной и неподвижных солнечных панелей. Рассмотрение каждого варианта осуществлялось на основании мощностных показателей солнечной панели в течении одного календарного года. На основании полученных результатов был определен наиболее оптимальный вариант установки расположения солнечной панели относительно положения Солнца.

Ключевые слова: солнечная панель, солнечная энергия, неподвижная солнечная панель, следящая за солнцем панель.

Одним из важнейших способов повышения эффективности солнечных батарей является оптимизация положения панелей или работа в непрерывном режиме слежения за Солнцем. Количество энергии вырабатываемой солнечными панелями зависит от целого ряда факторов. К факторам, которые относительно легко можно менять относят угол наклона и направление установки.

Чтобы поглощать максимальное количество солнечной энергии плоскость солнечной панели должна быть всегда перпендикулярна солнечным лучам. Однако Солнце светит на Земную поверхность в зависимости от времени суток и времени года всегда под различным углом. Чтобы производительность солнечной панели была максимальной необходимо определить угол наклона и направление панели в каждый момент времени. Для оценки оптимального ориентирования панелей учитывается вращение Земли вокруг Солнца и вокруг своей оси, а также изменение расстояния от Солнца. Для определения положения солнечной батареи необходимо учитывать основные угловые параметры:

- географические координаты места установки (широта, φ , долгота, λ);
- часовой угол, ω ;
- угол солнечного склонения, δ ;
- угол возвышения, H ;
- азимут, A .

Географические координаты определяют положение точки на земной поверхности. Широта – угол φ между местным направлением зенита и плоскостью экватора, отсчитываемый от 0° до 90° в обе стороны от экватора. Долгота – угол λ между плоскостью меридиана, проходящего через данную точку, и плоскостью начального нулевого меридиана, от которого ведётся отсчёт долготы.

Часовой угол (ω) переводит местное солнечное время в количество градусов, которое Солнце проходит по небу. По определению, часовой угол равен нулю в полдень. Так как Земля поворачивается на 15° за один час, то за каждый час после полудня Солнце проходит 15° . До полудня угол Солнца отрицательный, после полудня – положительный [1].

$$\omega = 15^\circ(LST - 12) \quad (1)$$

Двенадцать дня местного солнечного времени (LST) наступает в момент верхней кульминации Солнца. Местное время (LT), как правило, варьируется от LST из-за эксцентриситета орбиты Земли, и из-за человеческих корректировок, таких как часовых поясов и перехода на летнее время [1].

$$LST = LT + \frac{TC}{60}$$

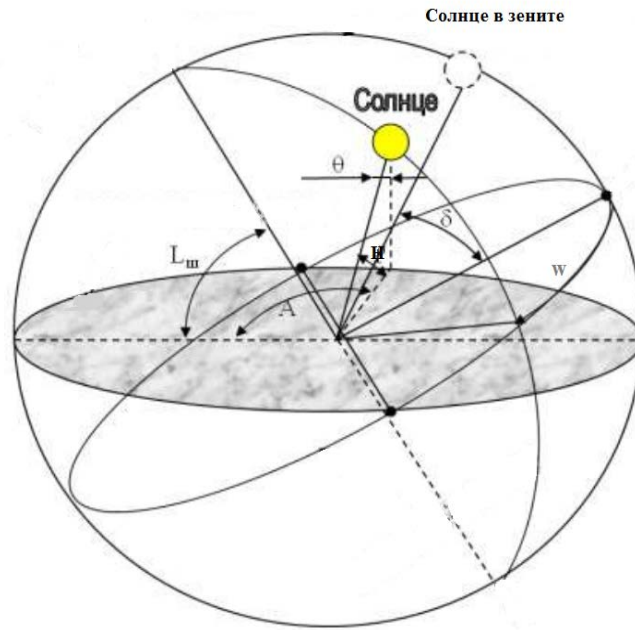


Рис. 1. Схема движения Солнца по небосклону

Временной поправочный коэффициент (в минутах) рассчитывается для учета изменения местного солнечного времени в одной временной зоне при изменении долготы в пределах этой зоны, а также учитывает уравнение времени [1]:

$$TC = 4(\lambda - LSTM) + \eta$$

Множитель, равный четырем минутам учитывает то, что Земля поворачивается на 1° каждые 4 минуты.

Местный стандартный временной меридиан (LSTM) – это меридиан, используемый для обозначения определенной временной зоны и для установления среднего времени по Гринвичу.

LSTM рассчитывается с помощью формулы

$$LSTM = 15^\circ \cdot \Delta T_{GMT},$$

где ΔT_{GMT} – разница между местным временем и средним временем по Гринвичу в часах.

Разность между средним временем и истинным солнечным временем в один и тот же момент называется уравнением времени η [2]:

$$\eta = T_m - T_{\odot}$$

Так как среднее экваториальное солнце проходит через меридиан то раньше, то позже истинного Солнца, разность их часовых углов (уравнение времени) может быть, как положительной, так и отрицательной величиной.

Уравнение времени и его изменение в течение года представлено на рисунке 2 сплошной кривой. Эта кривая является суммой двух синусоид с годичным и полугодовым периодами. Синусоида с годичным периодом (штриховая синяя кривая) дает разность между истинным и средним временем, обусловленную неравномерным движением Солнца по эклиптике. Эта часть уравнения времени называется уравнением центра или уравнением от эксцентриситета. Синусоида с полугодовым периодом (штриховая красная кривая) представляет разность времен, вызванную наклоном эклиптики к небесному экватору, и называется уравнением от наклона эклиптики.

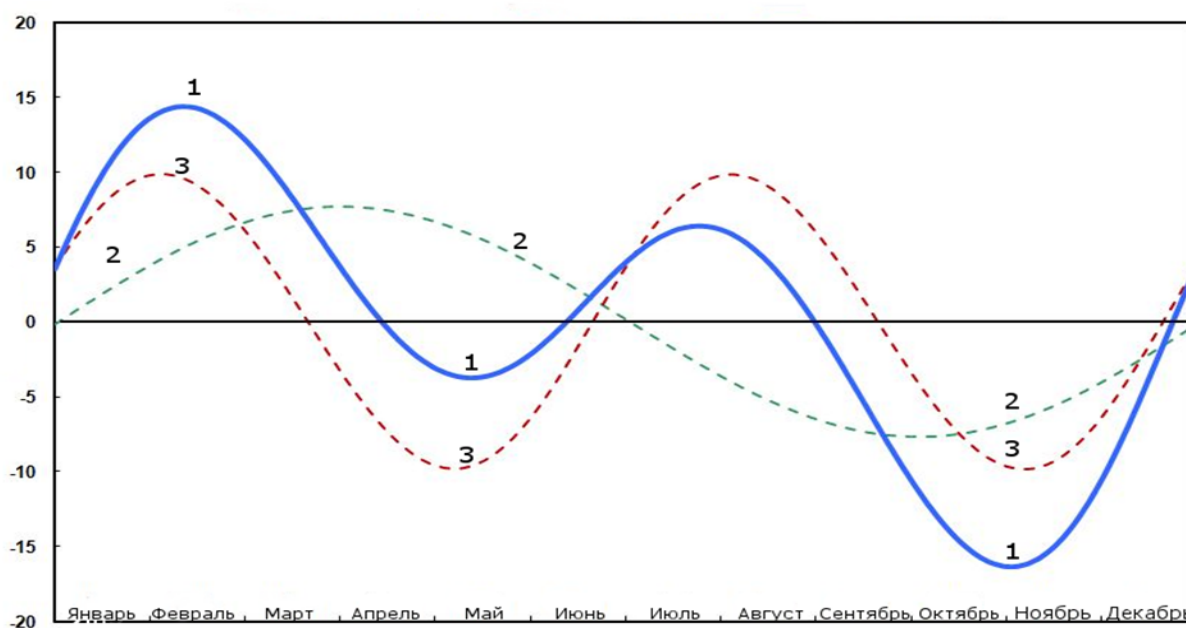


Рис. 2. График уравнения времени: 1—уравнение времени, 2—уравнение центра, 3—уравнение от наклона эклиптики

Уравнение времени обращается в нуль около 15 апреля, 14 июня, 1 сентября и 24 декабря и четыре раза в году принимает экстремальные значения; из них наиболее значительные около 11 февраля ($\eta = +14^m$) и 2 ноября ($\eta = -16^m$). Урав-

нение времени можно решить для любого момента времени. В некоторых англоязычных изданиях можно встретить определение уравнения времени как разницу между истинным солнечным временем и средним солнечным временем [1]. Данное определение формально более точно, но не влияет на результат, так как для любой конкретной точки на Земле эта разница одинакова.

Уравнение времени в минутах можно аппроксимировать членами ряда Фурье как сумму двух синусоидальных кривых с периодами, соответственно, на один год и шесть месяцев [1]:

$$\eta = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B,$$

где

$$B = \frac{360}{365}(d - 81)$$

в градусах и d – количество дней с начала года.

Склонение Солнца – это угол между экватором и воображаемой линией, соединяющей центры Земли и Солнца. Значение склонения Солнца, которое обозначается как δ , претерпевает сезонные изменения. Это происходит из-за того, что Земля движется по эллиптической орбите вокруг Солнца, а также из-за наклона ее собственной оси вращения. Земля наклонена на 23.45° и угол склонения принимает значения от 23.45° до -23.45° . Склонение равно 0 в дни равноденствий (22 марта и 22 сентября), положительно, когда в северном полушарии лето и отрицательно, когда там зима. Максимум, равного 23.45° склонение достигает 22 июня (летнее солнцестояние в северном полушарии) и минимума, -23.45° , 22 декабря (зимнее солнцестояние в северном полушарии). Склонение можно посчитать по формуле [1]:

$$\delta = 23.45^\circ \sin B. \quad (2)$$

Угол возвышения – это высота Солнца на небе измеренная в градусах от горизонтального положения. Угол возвышения изменяется в течение дня. Он также зависит от широты местоположения и времени года.

Угол возвышения можно найти по следующей формуле [1]:

$$\sin H = \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \quad (3)$$

Зенитный угол – это угол между Солнцем и вертикалью [1]:

$$\zeta = \varphi + \delta \quad (4)$$

Чтобы рассчитать время восхода и захода Солнца нужно положить угол возвышения равным нулю, тогда уравнение примет вид [1]:

$$\text{Восход солнца} = 12 - \frac{1}{15^\circ} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) - \frac{\tau c}{60} \quad (5)$$

$$\text{Заход солнца} = 12 + \frac{1}{15^\circ} \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) - \frac{\tau c}{60} \quad (6)$$

Полярный угол (азимут) можно рассчитать, зная параметры, введенные ранее [1]:

$$A = \cos^{-1} \left[\frac{\sin \delta \cos \psi - \cos \delta \sin \psi \cos \omega}{\cos \alpha} \right] \quad (7)$$

Приведенное выше уравнение справедливо только для полярных углов в течении солнечного утра. Так как в (7) уравнении используется косинус, угол азимута всегда будет положителен, и должен быть интерпретирован как угол меньше чем 180 градусов, когда часовой угол, ω , будет отрицателен (до полудня) и угол, больше, чем 180 градусов, когда часовой угол, ω , положителен (после полудня):

Азимут = A , для $LST < 12$ или $\omega < 0$

Азимут = $360^\circ - A$, для $LST > 12$ или $\omega > 0$

Плотность потока энергии, падающей на модуль, зависит не только от плотности потока самого солнечного излучения, но также и от угла между модулем и Солнцем. В случае, когда поглощающая поверхность и солнечное излучение перпендикулярны друг другу плотность потока излучения, падающего на панель, максимальна. При изменении угла плотность потока получаемого солнечного излучения уменьшается. Составляющая излучения, параллельная наклонному модулю, отражается. На рисунке 3 показано, как рассчитать излучение, падающее на наклонную (S_m) поверхность либо при условии данной плотности потока на горизонтальной поверхности (S_h), либо на перпендикулярной (S_i).

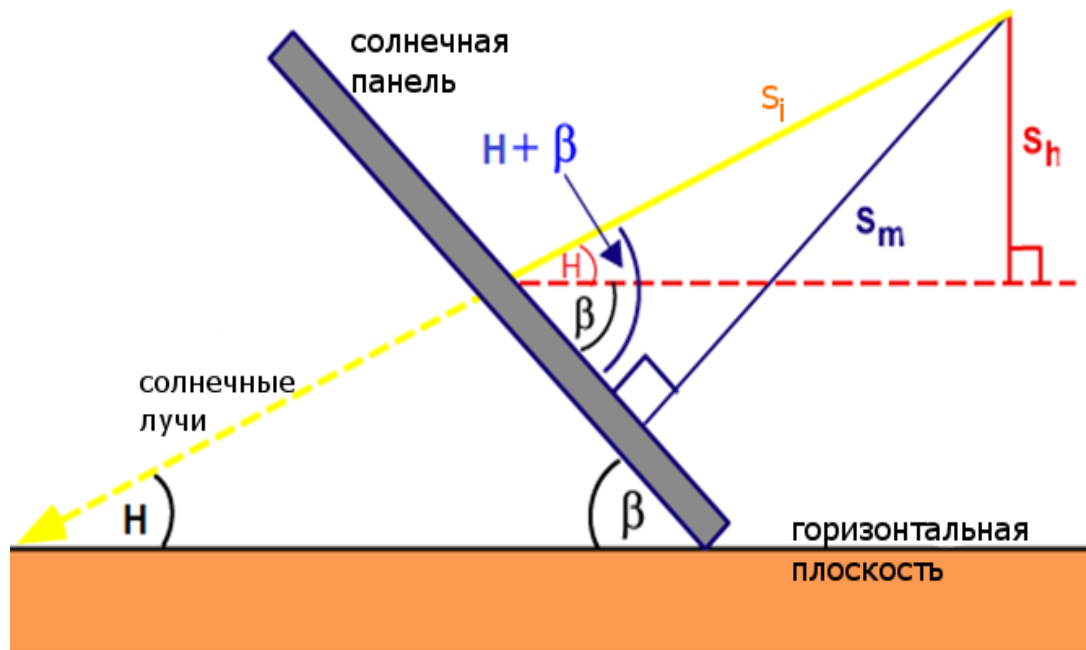


Рис. 3. Солнечные излучения, падающие на солнечную панель

Уравнения, связывающие S_m , S_h и S_i :

$$S_h = S_i \sin H, \quad (8)$$

$$S_m = S_i \sin(H + \beta), \quad (9)$$

где H – угол возвышения, β – угол наклона модуля

Для модуля с произвольной ориентацией и углом наклона уравнение становится немного более сложным [1]:

$$S_m = S_i [\cos H \sin \beta \cos(\psi - A) + \sin \alpha \cos \beta], \quad (10)$$

где H – угол возвышения солнца, A – полярный угол солнца, β – угол наклона модуля. Если модуль просто лежит на земле, то $\beta = 0^\circ$, если поставлен вертикально, то $\beta = 90^\circ$. ψ – полярный угол, на который повернут модуль. Абсолютное большинство модулей ориентированы в сторону экватора. Модуль в южном полушарии будет обращен на север с $\psi = 0^\circ$, а модуль в северном полушарии обычно прямо на юг с $\psi = 180^\circ$. S_m и S_i – поверхностные плотности излучения модуля и падающего света, при чем S_i – это только прямая составляющая излучения (не учитывает рассеянное).

Рассмотрено 3 варианта установки солнечной панели:

- 1) Неподвижная горизонтальная панель ($\beta=0$, $\psi=0$).

2) Неподвижная панель, с углом наклона равным географической широте места установки ($\beta=\varphi$, $\psi=0$).

3) Следящая за Солнцем панель ($\beta=90-H$, $\psi=A$).

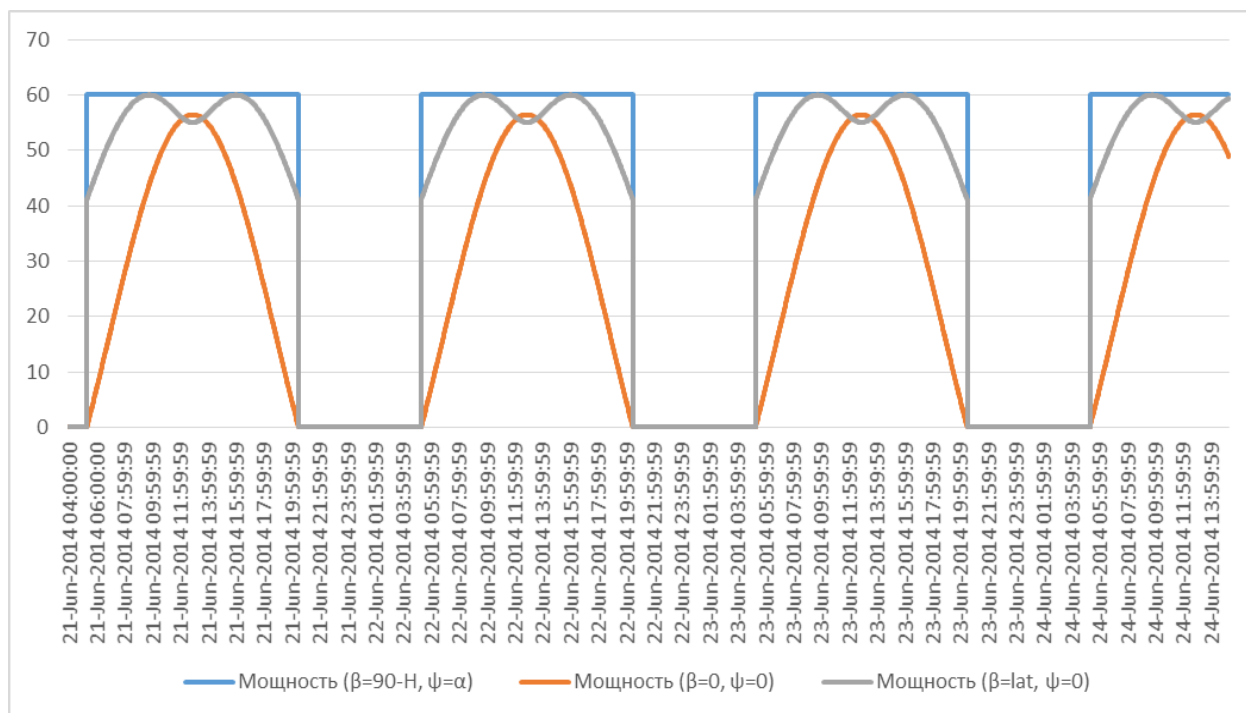


Рис. 4. График зависимости мощности солнечных панелей различной ориентации, в период 21 июля – 24 июля в г. Алматы

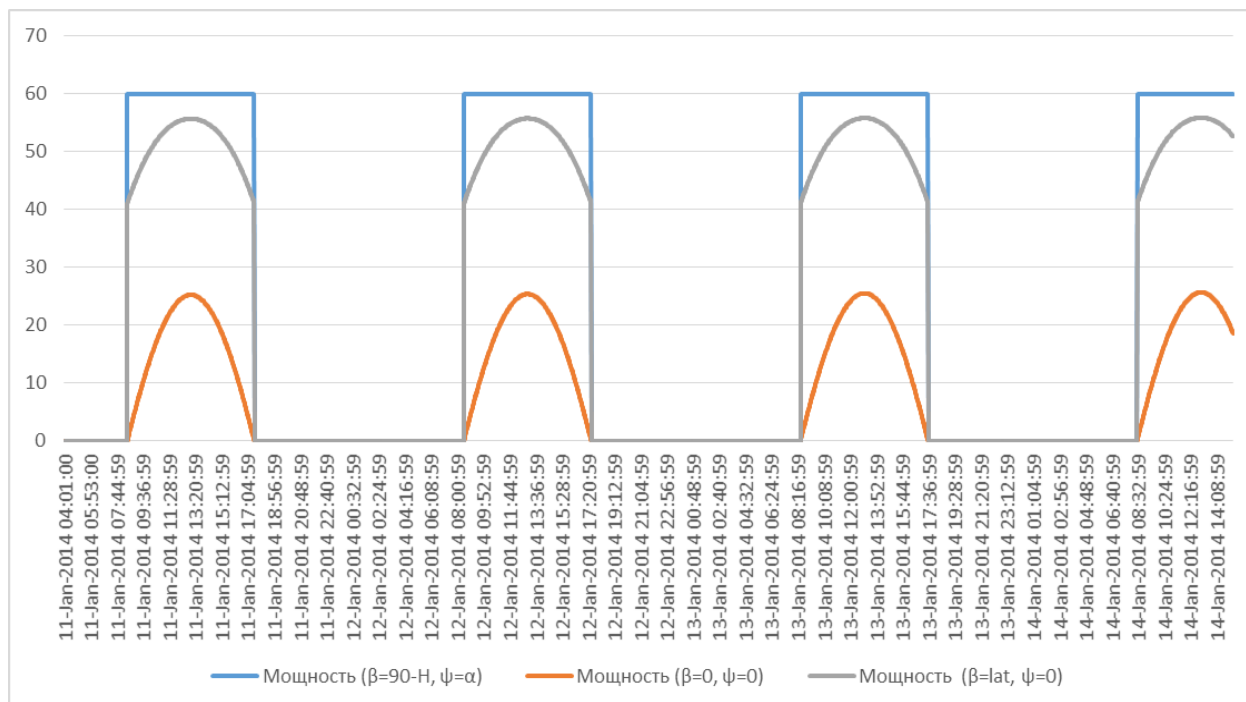


Рис. 5. График зависимости мощности солнечных панелей различной ориентации, в период 11 января – 14 января в г. Алматы

В разное время года количество мощности, вырабатываемой солнечными панелями получаются разными. Однако поворачивающаяся за Солнцем панель всегда более эффективна неподвижных панелей. Производительность панелей в зимнее время уменьшается, эффективность следящих панелей в зимнее и летнее время отличается на 40%. По итогам проведенных расчетов мощность солнечных панелей в летнее время на неподвижной горизонтальной панели и неподвижной панели, с углом наклона равным широте места установки, составляет 57,26% и 92,09% соответственно от энергии, вырабатываемой следящей панелью. Зимой энергия неподвижной горизонтальной панели составляет лишь 28,4% энергии следящей за Солнцем панели, а преимущество следящей панели над наклоненной на угол равным широте места установки неподвижной панели не большая.

Таблица 1

Мощность солнечных панелей различной ориентацией за каждый месяц,
кВт

Месяцы	Варианты установки солнечной панели		
	Следящая за Солнцем панель	Неподвижная горизонтальная панель	Неподвижная панель, с углом наклона равным широте места установки
Январь	1026,6	291,59	879,72
Февраль	1036,2	368,57	919,45
Март	1305,48	582,61	1195,283
Апрель	1427,04	746,25	1322,43
Май	1618,2	913,9	1493,75
Июнь	1636,44	945,95	1503,26
Июль	1656,12	948,23	1525,19
Август	1531,2	830,08	1418,46
Сентябрь	1323,18	631,62	1219,92
Октябрь	1198,74	463,25	1076,8
Ноябрь	1022,4	308,65	884,44
Декабрь	987,3	257,89	835,31
Год	15768,9	7288,59	14274.01

Таблица 2

Мощность солнечных панелей различной ориентацией за каждый месяц, %

Месяцы	Варианты установки солнечной панели		
	Следящая за Солнцем панель	Неподвижная горизонтальная панель	Неподвижная панель, с углом наклона равным широте
Январь	100,00%	28,40%	85,69%
Февраль	100,00%	35,57%	88,73%
Март	100,00%	44,63%	91,56%
Апрель	100,00%	52,29%	92,67%
Май	100,00%	56,48%	92,31%
Июнь	100,00%	57,81%	91,86%
Июль	100,00%	57,26%	92,09%
Август	100,00%	54,21%	92,64%
Сентябрь	100,00%	47,74%	92,20%
Октябрь	100,00%	38,64%	89,83%
Ноябрь	100,00%	30,19%	86,51%
Декабрь	100,00%	26,12%	84,61%
Год	100,00%	46,22%	90,52%

Анализ энергетических показателей различных типов установок и потерь мощности позволили определить, что наиболее эффективной является установка подвижной панели, следящей за Солнцем.

Но использование солнечных панелей с фиксированным наклонным углом равным широте места установки является менее эффективным в целом за год всего на 10%, зато позволяет избежать дополнительных затрат на систему слежения. При расчетах экономической эффективности солнечных электростанций необходимо определять, что дешевле – увеличивать площадь панели исходя из минимальных значений, достигающих 84,4 % от следящей, либо ставить систему слежения. Для получения энергии из неподвижной панели, наклоненный на угол широты местности, равной энергии со следящей за Солнцем панели необходимо увеличить площадь стационарной панели на 15,6%.

Список литературы

1. Christiana Honsberg, Stuart Bowden, «PVCDROM» <http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-time>
2. Э.В.Кононович, В.И.Мороз, «Общий курс астрономии», Учебное пособие под ред. В. В. Иванова. Изд. 2-е, испр., М.: Едиториал УРСС, 2004. – 544 с.