

Tracking Systems for Orientation of Solar Panels and Optimization of their Positioning Using Three-coordinate Platforms

Chalbash O.H.

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. Two-coordinate platforms equipped with orientation systems are 40-45% more effective than stationary installations. However, there are other factors affecting the efficiency of solar installations. In particular, the shading on the panels' surfaces when panels, located in rows, are casting shadows on each other. This negatively affects the efficiency of photovoltaic installations. Previous experience in the design of photovoltaic systems shows that neither stationary platforms nor two-coordinate installations completely eliminate energy losses due to shadow formation. The only way to mitigate this negative impact is to increase the distance between the panels. At the same time, and the density ratio (the ratio of the panel area to the area of the land) does not exceed 0.2. Our goal is to develop kinematic schemes and software control systems for three coordinate platforms that can avoid shadow formation on panels placed in constrained spaces. The result of our work is a numerical method that solves the optimization problem for controlling the motion of a set of platforms and a rational kinematic scheme for three coordinate platforms. This problem is especially relevant for solar photovoltaic systems located on space stations. In space, the changes in temperature between shaded and shadow-free sections of panels is enormous, due to temperature stress, the panels get destroyed and require expensive repairs. Three-coordinate tracking can reduce the surface occupied by solar panels by about 3 times compared to the currently used solutions and increased module placement densities from 0.2 to 0.6.

Keywords: tracking systems of solar installations, control system for monitoring the positioning of solar panels, optimization methods, platform's kinematic schemes.

Sisteme de urmărire pentru orientarea panourilor solare și optimizarea poziționării acestora utilizând platforme cu trei coordonate

Cealbaș O.H.

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei
Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Eficiența instalațiilor fotovoltaice cu poziționare fixată este cu 40-45% mai mică în comparație cu varianta de orientare pe două axe. Eficiența energetică de conversie este afectată și de alți factori, cum ar fi, umbrirea suprafețelor active a panourilor PV de alte panouri amplasate în apropiere. Ca o soluție competitivă privind diminuarea influenței factorului de umbrire se prezintă majorarea distanțelor dintre rândurile de montare a modulelor PV. Distanțele dintre axele platformelor, în funcție de latitudine, ating 2,5 - 4 dimensiuni globale ale panourilor, iar raportul de densitate (raportul dintre suprafața panoului și suprafața parcelei) nu depășește 0,2. Scopul acestei lucrări constă în elaborarea unei metode numerice pentru rezolvarea problemei de optimizare a controlului mișcării unui complex de platforme și unei scheme cinematice raționale pentru asigurarea poziționării dirijate pe trei coordonate a platformei și micșorarea gradului de umbrire a modulelor PV la montarea lor pe suprafețe cu aria limitată. În condiții spațiale fenomenul de umbrire conduce la creșterea forțelor mecanice de tensionare în elementele modulelor PV ce poate conduce la distrugerea modulelor și refuzul sistemului de alimentare. Dirijarea pe trei coordonate poate asigura micșorarea suprafeței ocupate de panourile solare de circa 3 ori în comparație cu soluțiile utilizate în prezent și creșterea densității de amplasare a modulelor de la 0.2 până la 0.6.

Cuvinte-cheie: sisteme de urmărire pentru instalații solare, poziționarea sistemului de control al panourilor solare, metode de optimizare și algoritmi.

Следящие системы для ориентации солнечных панелей и оптимизация их позиционирования с использованием трехкоординатных платформ

Чалбаш О. Х.

Институт энергетики Академии наук Молдовы
Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Эффективность стационарных установок на 40-45% ниже, чем у солнечных батарей, размещенных на 2-х координатных подвижных платформах и снабженных системами ориентации, в том

числе с функцией оптимизации. Существуют и другие факторы, влияющие на эффективность солнечных установок. В частности, фактор затенения поверхностей одних панелей другими, при рядном размещении на площадке множества солнечных модулей. Влияние данного фактора негативно отражается на эффективности фотоэлектрических установок. Опыт проектирования фотоэлектрических установок показывает, что ни стационарные станции, ни двух координатные установки не избавляют в полной мере от потерь энергии вследствие образования теней на поверхности панелей. Единственным способом «смягчения» негативного влияния данного фактора является дистанционирование платформ при их рядном размещении. Расстояния между осями платформ в зависимости от широты, достигают 2.5 – 4 габаритных размеров панелей, а коэффициент плотности размещения (отношение площади панелей к площади участка) не превышает 0.2. Цель работы – разработка кинематических схем и систем управления для трех координатных платформ, позволяющих избегать или существенно уменьшить образования теней при размещении платформенных модулей на ограниченных площадках. Основные результаты работы - разработка численного метода решения оптимизационной задачи управления движением комплекса платформ и рациональной кинематической схемы для трех координатных платформ. Данная проблема обретает особую актуальность для солнечных фотоэлектрических установок, размещенных и на космических станциях. В условиях космоса возникают огромные температурные перепады между затененными и свободными от теней участками панелей. Температурные напряжения, как следствие, приводят к разрушению панелей и необходимости проведения дорогостоящего ремонта. Трехкоординатное отслеживание может уменьшить площадь поверхности солнечных панелей примерно в 3 раза по сравнению с используемыми в настоящее время решениями и увеличить плотность размещения модулей от 0,2 до 0,6.

Ключевые слова: следящие системы солнечных установок, система управления позиционированием солнечных батарей, методы оптимизации, кинематические схемы платформ.

1. Введение

Солнечные фотоэлектрические панели способны вырабатывать максимально возможную (номинальную) энергию лишь при нормальном угле падения солнечных лучей на плоскость панели [1,2].

Существуют эмпирические зависимости, отображающие эффект снижения мощности генерации модулей PV, а следовательно и уменьшение количества произведенной электрической энергии при отклонении их поверхность от нормали (Snell's law). С незначительной погрешностью можно считать, что указанная зависимость подчиняется косинусоидальному закону в диапазоне от 0 до 90 град. (см. таблицу 1).

Для нормальной ориентации плоскости к произвольному вектору необходимо и достаточно придать плоскости любые две степени свободы вращения из трех возможных.

На этом принципе основаны кинематика и системы управления всех существующих двух координатных платформ – следящих систем. Для нормальной ориентации плоскости к произвольному вектору необходимо и достаточно придать плоскости любые две степени свободы вращения из трех возможных.

На этом принципе основаны кинематика и системы управления всех существующих

двух координатных платформ – следящих систем[3].

Таблица 1
Потери от угла отклонения

Угол падения лучей света (град.)	Потери в %	
	Эмпирич. (%)	Косинус. (1-cos γ)100%
1	2	3
9	1,2	1,23
18	4,9	4,89
40	19,0	23,39
45	29,0	29,29
90	100	100

Изучение снижения эффективности генерации PV установок вследствие затенения поверхности панелей представляется достаточно сложной как в физическом аспекте, так и в математическом (с точки зрения оптимальной ориентации) [4]. В физическом аспекте, суть проблемы состоит в установлении функциональной связи между площадью затененной поверхности и возможным объемом не произведенной электрической энергии из-за частичного взаимного затенения активных поверхностей единичных модулей. Имеется достаточно большое количество экспертных оценок по этому поводу [5-9]. Наиболее

полным исследованием в данной области представляется работа Г. Раушенбаха [4]. Интересные результаты также опубликованы в работе [8].

Отметим, что при размещении комплекса панелей на двух координатных платформах в принципе невозможно избежать образования теней на их поверхностях. Исходя из данного замечания, представляется интересным рассмотреть вопрос применения платформ с управления по трем координатам [5]. Однако, переход к рассмотрению трех координатных систем пространственной ориентации сопровождается появлением новых теоретических и практических проблем, связанных с переходом на более сложные в управлении объекты. Одной из главных проблем является разработка математических методов и алгоритмов для оптимального позиционирования панелей (в частности, для управления третьей координатой).

Сложность и актуальность данной задачи подтверждается и интересом к ней таких организаций как НАСА (задача НАСА), условия которого были опубликованы на сайте «<http://topcoder.com/>» в январе 2013 года [10]. Эта задача представляет известный интерес в математическом аспекте.

Суть задачи – дать решение для управления позиционированием панелей (американского модуля *Международной космической станции - МКС*) таким образом, чтобы генерировать максимальное количество энергии в каждый дискретный интервал времени. Требовалось учитывать фактор возникновения теней и их влияние на энергетическую эффективность и данное условие переводило данную задачу в ранг неординарных задач.

Анализ этой задачи показал, что она близка к классу так называемых NP - задач, по крайней мере, в контексте комбинаторной оптимизации [11]. Можно было предположить возможность поиска теоретического решения, исследуя закономерности возникновения теней (проекции одних панелей на другие, расположенные по ходу луча) при различных углах ориентации панелей. Но задача усложняется явлением возникновения гомогенных групп проекций теней на активных поверхностях модулей, т.е. дублирующихся наложений проекций затенений и вытекающей отсюда

необходимости вычленения дублирующих областей.

Целью данной работы является разработка численного метода решения оптимизационной задачи управления движением комплекса платформ и рациональной кинематической схемы для трех координатных платформ с получением максимально возможного количества электрической энергии от PV установок.

2. Концепция решения задачи

Единственной реальной возможностью решения такой задачи представлялся поиск и использование эвристических методов и алгоритмов на основе применения численных методов. Для иллюстрации эффективности разработанного подхода решения задачи оптимизации генерации электрической энергии по критерию максимального ее производства на первом этапе рассмотрена задача НАСА [10]. Рассмотрена схема подвижных платформ (2-х координатная схема) используемая на МКС. Параметрический анализ работы этой установки показал, что управление позиционирования PV модулей по 2-х координатной схеме не позволяет исключать полностью явление затенения активных генерирующих поверхностей панелей. Можно лишь обеспечить наилучший компромисс между показателем потенциальных „потерь” энергии от затенения и от отклонения углов ориентации панелей от нормали. Результаты использования предложенных алгоритмов оптимизации ориентирования PV модулей с использованием известных схем подвижных платформ (2-х координатная схема) кинематических и их модификации приведены на рис.3.

Отметим такой немаловажный аспект, как вопрос повышения эффективности генерации установок возобновляемой энергии, которые подключены к электроэнергетическим системам. В концептуальном плане задача повышения эффективности генерации таких систем не отличается от “космической задачи” использования таких установок, поскольку и в случае наземной установки существуют ограничения по площади их монтажа. Электрические станции на основе PV модулей требуют отчуждения значительных участков земли на эти цели, в

том числе и пахотных земель. Уменьшение отчуждаемых земель для производства этим способом электрической энергии является не только технико - экономической задачей, но имеет и социальные аспекты. В этом контексте, повышение эффективности генерации наземных установок солнечной энергетики представляется очень актуальной и экономически важной задачей.

Поэтому, для оптимального управления позиционированием PV модулей наземных солнечных электростанций весьма перспективным представляется вариант управления по трем координатам. При этом исходим из гипотезы, что такой подход решения задачи для наземных трех координатных систем ориентации, способен принципиально решать проблему исключения теней на поверхности панелей, а следовательно и увеличить производство электрической энергии с единицы занимаемой площади установки PV модулей.

Обоснованность такой постановки задачи для повышения генерации электрической энергии имеет и экспериментальное подтверждение эффективности данного подхода [12].

3. Эффективность трех координатной системы управления

Для случая наземных фотоэлектрических станций на базе подвижных платформ, результаты оказались весьма обнадеживающими, как с точки зрения управления, так и в экономическом аспекте. Для сопоставительного анализа системы управления на основе оптимизирующих алгоритмов, а также для оценки сложности отладки систем управления платформ с трех координатной кинематической схемой могут быть использованы данные полученные на лабораторной экспериментальной установке при трех координатном управлении [12].

В таблице 2 приведены некоторые сравнительные параметры электрических солнечных электростанций станций использующие принцип двух и трех координатных систем управления. В качестве примера для сравнительного анализа использована действующая станция на базе двух координатных платформ немецкой компании *DEGERenergie GmbH & Co. KG* [13].

На рис. 1 и 2 показаны планы размещения двух и трех координатных платформ, соответственно, на нормативных и критических дистанциях.

В таблице 2 приведены сравнительные показатели, соответствующие размещению обоих типов платформ на участке площадью 660 кв.м.

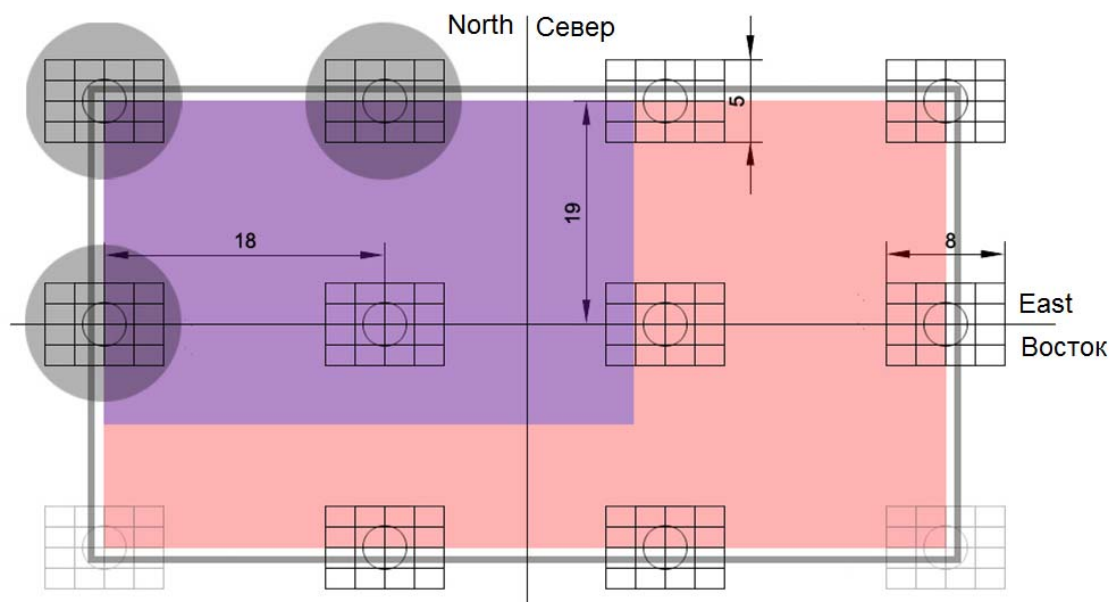


Рис. 1. План размещения 2-х координатных платформ на стандартных дистанциях. $S=2052$ кв.м (54x38), коэффициент компактности размещения – 0,195.

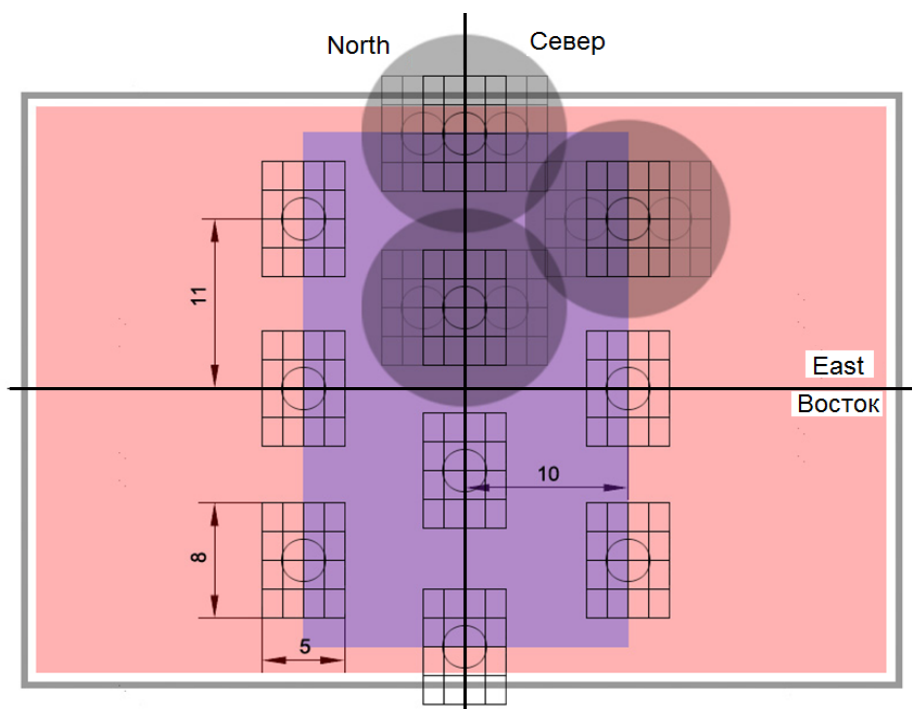


Рис. 2. План размещения 3-х координатных платформ на критических дистанциях. $S=660$ кв.м (33x20), коэффициент компактности размещения – 0,606.

Сравнительные параметры станций на базе 2-х и 3-х координатных систем. Таблица 2

№	Название параметра	Значение параметра	
		2-х координат. модели 5000NT	3-х координат. модифицир.
1	2	3	4
1	Площадь панелей одной платформы (кв.м)	40	40
2	Габаритные размеры панели на платформе (м)	5.3 x 8.3	5.3 x 8.3
3	Число платформ (ед.)	10	10
3	Габаритные размеры не нормативного участка (мхм)	33 x 20	33 x 20
4	Площадь участка (кв.м)	660	660
5	Номинальная мощность станции (кВт)	70	70
6	Относительное значение площади свободной от тени, среднегодовое значение (%)	85.35	95.69
7	Объем вырабатываемой энергии за период эксплуатации – 30 лет (кВт.)	2375721.6	3070368
8	Затраты без учета стоимости участка (\$)	104000	116800
9	Валовой доход при цене 0.2\$/кВт-час (\$)	371144.32	497273.6
10	Рентабельность (%)	456.87	525.75
11	Срок окупаемости (лет)	7	6

Если станцию на базе двух координатных платформ размещать на стандартных (нормативных) дистанциях (рис. 1 и 2), то она заняла бы участок площадью 2052 м^2 (54 м x 38 м). И в этом случае на реальном участке площадью 660 м^2 можно было бы разместить только четыре платформы из десяти, не

обеспечив 60% от заявленной номинальной мощности.

В то же время, размещение 2-х координатных платформ на критических дистанциях приводит к значительной потере мощности станции вследствие интенсивного образования теней.

Таким образом, одно из основных преимуществ 3-х координатных платформ -

компактность размещения, благодаря возможности сокращать дистанции между платформами вплоть до критических размеров (ближе которых они будут задевать друг друга при вращении) без существенных потерь мощности вследствие затенения.

На сайте «<http://bluebox-labs.com/>» [12] также приведены некоторые материалы раскрывающие существо данного проекта.

4. Оптимизации позиционирования солнечных панелей на МКС

После создания экспериментальной установки и разработки программных приложений (для проектирования и собственно оптимального управления), мы рассмотрели „космическую проблематику”- о возможности использования трех координатных систем на МКС. Эти исследования носят теоретический характер, но существует надежда, что в них может быть “рациональное зерно”.

Последующее изложение разделим на две части. В первой части приведем результаты решения оптимизационной задачи (для американского модуля МКС в модифицированной версии) для двух координатных платформ, а во второй части рассмотрим некоторые вопросы, связанные с замещением двух координатных платформ на трех координатные.

4.1. Оптимизации позиционирования солнечных панелей при использовании двух координатной системы.

Мы изменили кинематическую схему (изменения показаны на рис. 3а и 3б), придав каждой паре панелей (*Array Wings*) возможность иметь по две независимых степени свободы. Наверняка, конструкторы НАСА имели основания применить такую кинематическую схему, но с теоретической точки зрения она является частным случаем, при котором каждый тандем из двух пар имеет нулевые дистанции между точками крепления к мачте. К тому же, поскольку две пары в тандеме сблокированы (по углу φ), можно считать, что каждая из двух пар панелей объединенного блока фактически не имеет двух независимых степеней свободы для вращения.

При необходимости разрешив общую задачу, всегда можно получить и частное решение. Возможно, существуют предпосылки, обусловившую такую кинематическую схему (рис. 3а), но с теоретической точки зрения блокировка двух пар панелей на одном приводе лишает смысла наличие независимого вращения для каждой пары. Такой вывод сделан на том основании, что для каждой пары углов $\{\alpha_{sun}; \beta_{sun}\}$, определяющих положение вектора излучения, существует только одна единственная пара углов $\{\varphi_k; \theta_k\}$, обеспечивающих нормальную ориентацию панелей*).

Любое отклонение сблокированной группы (от оптимальной позиции) вокруг мачты на угол $\Delta\varphi$ или отклонение любой пары группы вокруг продольной оси на угол $\Delta\theta$ приведет к снижению выработки энергии. Иначе, плоскости панелей в оптимальном (по углу) режиме должны иметь коллинеарные нормальные вектора. Можно допустить, что это продиктовано проблемами обеспечения температурного режима, условиями работы аккумуляторных батарей или иными, неизвестными нам причинами. В результате такой модификации возросла вариабельность системы, и как следствие, расширилась область допустимых решений оптимизационной задачи.

Рассмотрим существо поставленной задачи. На определенных углах солнечной эклиптики панели могут отбрасывать тень друг на друга. Для любой пары углов $\{\alpha_{sun}; \beta_{sun}\}$ необходимо найти такое позиционирование (т.е. пары углов $\{\varphi_k; \theta_k\}$) для всех панелей системы – $k = 1, 2, \dots, N$ (N – общее число панелей системы), при котором бы обеспечивалась максимальная выработка энергии. Укажем, что попытка «развести» панели так, чтобы минимизировать суммарную площадь возникающих теней, в общем случае будет приводить к отклонению от оптимальных углов (отклонению от нормали), а оптимальное по углу позиционирование панелей может приводить в общем случае к отклонению от минимально достижимого значения суммарной площади теней (оптимальной позиции «по тени»).

*Углы $\{\varphi_k; \theta_k\}$ в данной части статьи имеют иную смысловую интерпретацию. Их аналогами во второй части статьи являются углы $\{\beta_k; \alpha_k\}$

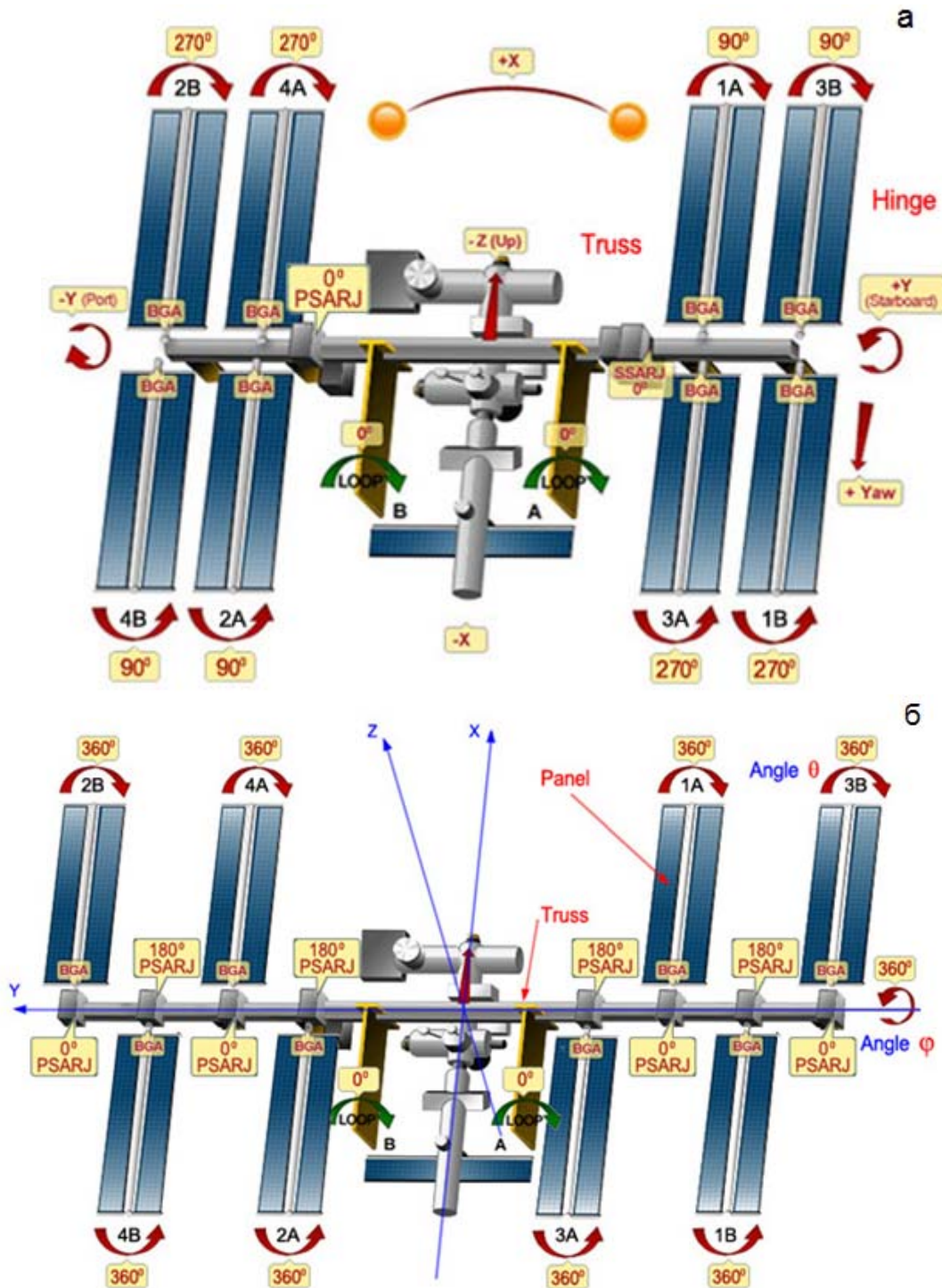


Рис. 3. Схема размещения солнечных панелей на МКС.
Слева а) – парноблокированная (реальная); справа б) – независимая модифицированная.

Формально использование критериев оптимизации вида- минимизация отклонения угла от нормали и минимизация площади тени, позволяет отнести ее к классу задач многокритериальной оптимизации.

Но проблему многокритериальности представляется возможным снять, ввиду

сводимости указанных критериев к коэффициенту относительной выработки энергии ($E\%$).

Таким образом, в рамках такой концепции, систему панелей на МКС можно представить как прямоугольные «лепестки», консольно размещенные на мачте (рис. 4).

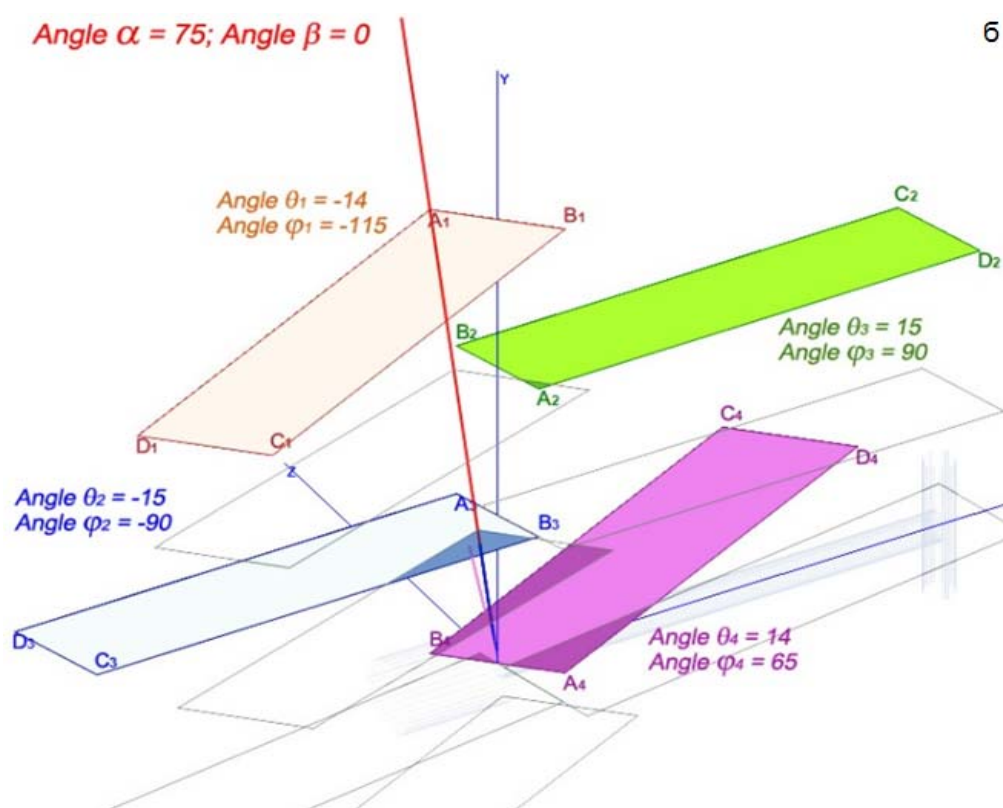
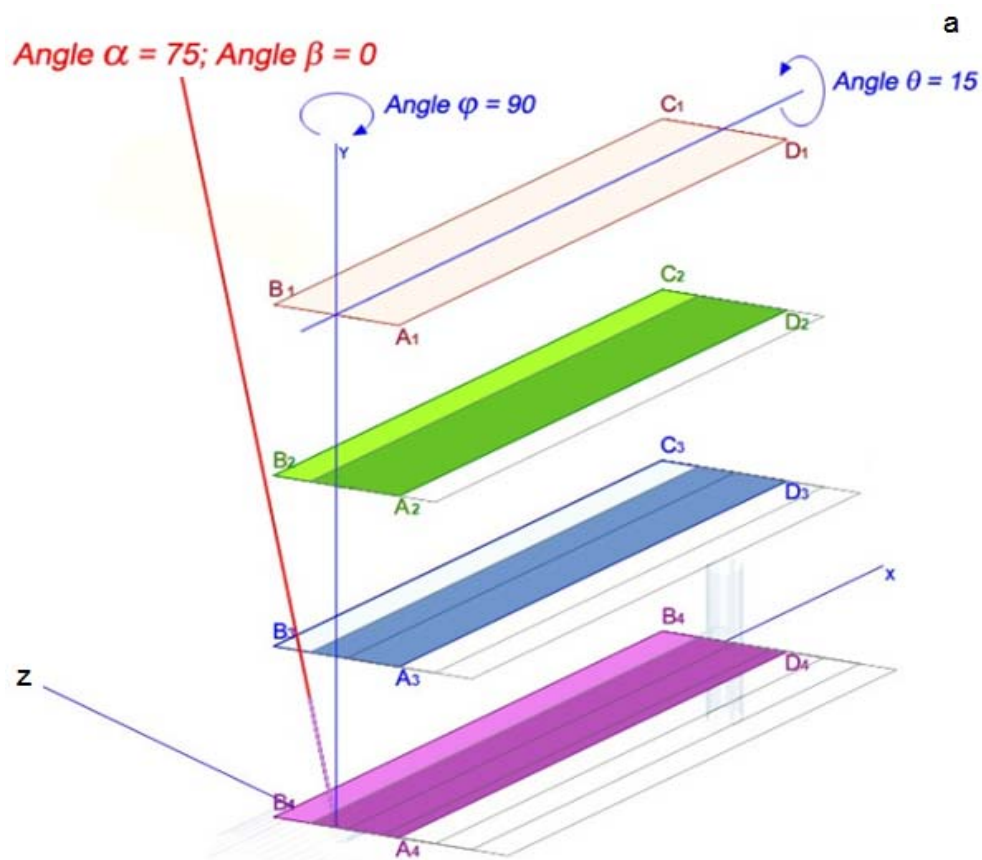


Рис. 4. Схематическое изображение 2-х координатной многоуровневой системы панелей.

Из рис. 4а видно, что при данных углах вектора излучения имеет место значительная затененность панелей, хотя они размещены оптимально по углу. Единственный способ сокращения площади затенения (при данной кинематической схеме) состоит в разведении панелей вокруг оси ОУ (изменять углы φ_k).

На рис.4б показан один из вариантов оптимального позиционирования панелей, предельно сокращающий площадь затенения. Как видно из рис. 4б, условие оптимальности по углу сохраняется не для всех панелей. Панели 1 и 4 имеют углы θ_k , меньшие, чем оптимальный, равный в данном положении 15-ти градусам.

Следует отметить, что при каждом отклонении от оптимального положения по углу, происходящем при повороте панелей на угол $\Delta\varphi$ осуществляется коррекция угла θ таким образом, чтобы обеспечивалась максимально возможная выработка энергии

(см. закон косинуса) для данного угла $\varphi' = \varphi + \Delta\varphi$.

Существенной особенностью такой кинематической схемы для определенного диапазона углов склонения является следующее принципиальное положение – оптимальное решение всегда характеризуется компромиссом между недовыработкой энергии от затенения и от отклонения от нормали.

Термин «определенный диапазон углов» здесь также имеет конкретное значение и зависит от ширины панелей и дистанций между точками их крепления на мачте. Для установления значения диапазона необходимо ввести понятие критического угла для данной конкретной системы. На рисунке 5 показана схема определения данного угла

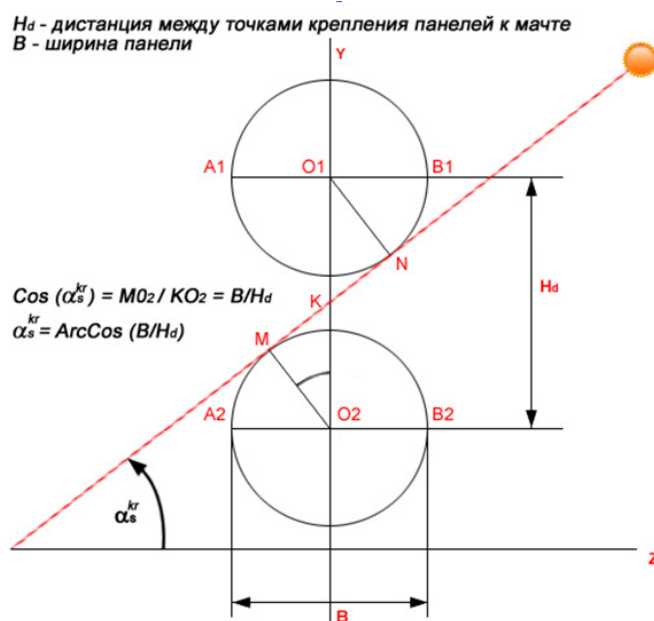


Рис. 5. Схема для определения критического угла склонения.

В диапазоне углов склонения менее критического всегда возможно позиционировать панели таким образом, чтобы оптимизировать их положение по углу, избегая возникновения теней.

Соответственно, в диапазоне углов превышающих критический угол, тени будут неизбежно возникать, и необходима «компромиссная оптимизация».

Определенный интерес представляет 3-х мерная визуализация «топологии» области допустимых решений (правда это возможно не более чем для 2-х панелей).

Для системы, состоящей из двух панелей (тривиальный случай) построена 3-х мерная компьютерная модель зависимости относительной эффективности выработки энергии от значения углов ориентации $E = E(\varphi; \theta)$, как для зависимости эффективности «по углу», так и для зависимости ее от

площади тени. На рис. 6 представлена графическая интерпретация этих зависимостей (3-х мерные «топологии» решений). Отобразить данную зависимость в 4-х и более мерных пространствах (т.е. для системы, включающей три, и более панелей) не представляется возможным.

Указанные 3-х мерные интерпретации, в частности, были выполнены для анализа закономерностей поведения системы и использованы впоследствии для разработки эвристического метода оптимизации позиционирования панелей.

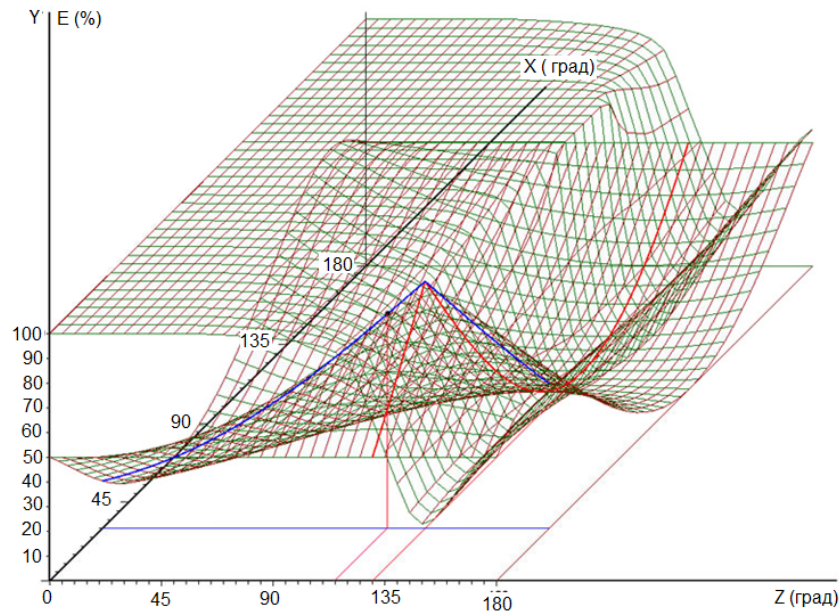


Рис. 6. Графическая интерпретация эмпирических зависимостей $E_{\text{angl}} = E(\varphi; \theta)$ и $E_{\text{shad}} = E(\varphi; \theta)$ для двух панелей (уровень дискретности – 5 град.).

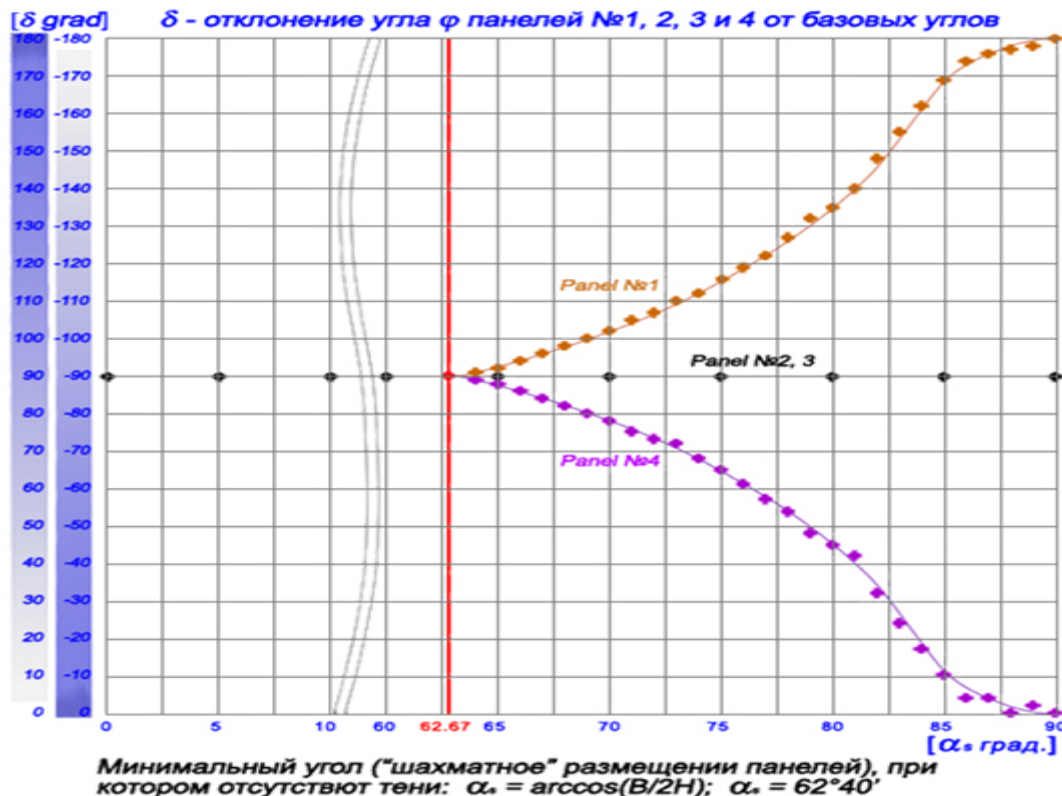


Рис. 7. Эмпирические кривые, отражающие «оптимальные» зависимости углов φ ориентации панелей от угла склонения α ($N=4$) для 2-х координатных установок.

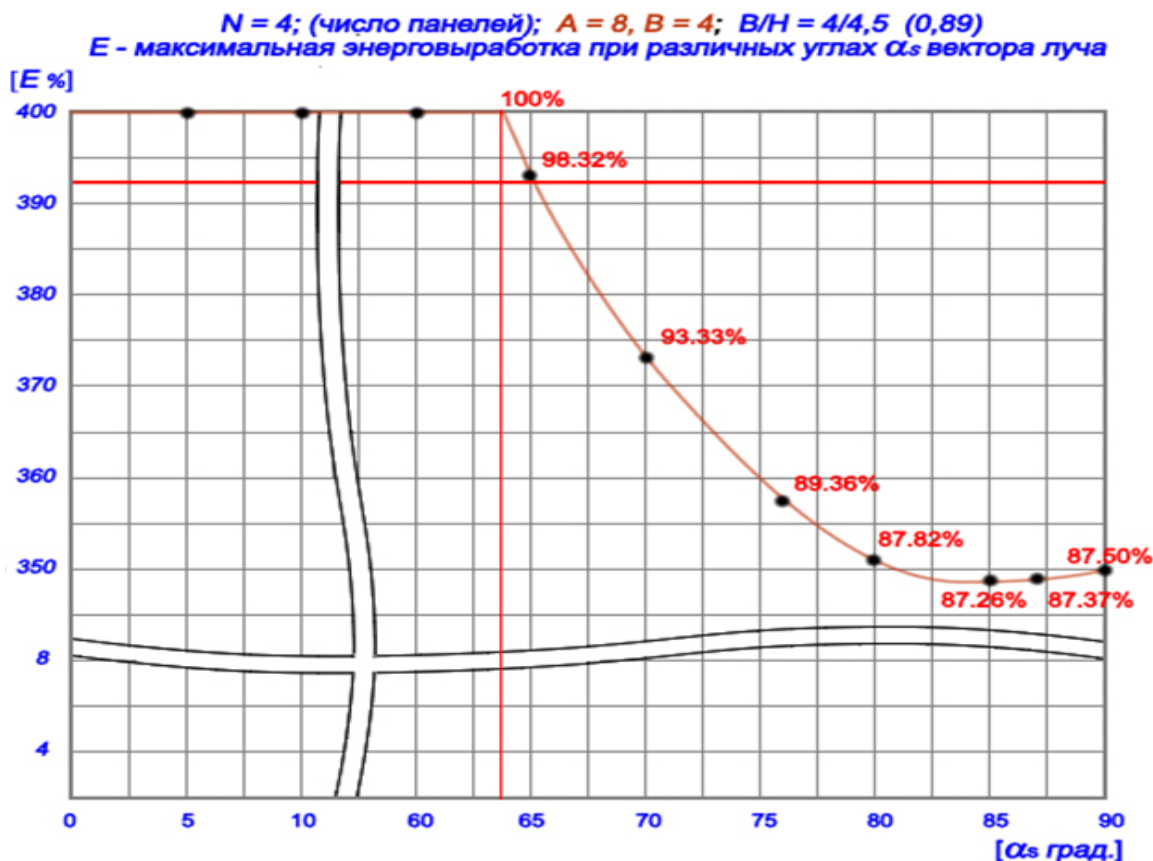


Рис.8. Динамика изменения эффективности выработки энергии в зоне «пост критических» углов наклона в оптимальном режиме для 4-х панелей.

На рис. 7 показаны для иллюстрации зависимости углов ориентации панелей φ от угла наклона α_s . Для удобства в качестве азимутальных углов φ_k представлены их отклонения δ_k от некоторых заданных начальных значений. При этом, зенитные углы θ_k соответствуют оптимальному значению, для данного угла отклонения φ_k .

На рис.8 показаны изменения выработки энергии в зоне «пост критических» углов наклона в оптимальном режиме.

В дальнейшем, мы не стали усовершенствовать методы оптимизации, разработанные для 2-х координатных систем. Причина - в очевидной бесперспективности такой кинематической схемы для полного исключения теней на поверхности панелей.

Тем не менее, некоторые методические положения и промежуточные результаты были использованы в дальнейшем, при разработке оптимизирующих алгоритмов для трех координатных систем.

Во второй части данной статьи представлены некоторые положения и результаты такого исследования.

4.2. Оптимизация позиционирования солнечных панелей для трех координатных систем

Рассматривая проблемы применения трехкоординатных систем для энергетических установок космических станций (КС), мы пришли к следующему заключению. Несмотря на принципиальное сходство условий, необходимо учитывать ряд обстоятельств (по крайней мере, очевидных для нас), продиктованных «космической» спецификой. Рассмотрим их.

Для проведения сравнительного анализа эффективности 2-х и 3-х координатных систем необходимо интегрировать статистику – результаты решения оптимизационной задачи для годового цикла. Но, для этого необходимо, в качестве исходных данных, иметь параметры «космической» эллиптики для годового цикла, причем для конкретных параметров орбиты станции. Насколько нам известно, такие математические модели существуют (т. н. «уравнения времени»), но мы ими не располагаем.

Заметим лишь, что для проведения аналогичных расчетов для наземных установок использовались либо диаграммы Купера [1], либо более точные «уравнения времени», учитывающие сидерические сутки [14].

На основе разработанной программы оптимизации можно получить сравнительные данные лишь для любой произвольной пары углов $\{\alpha_{sun}; \beta_{sun}\}$, однозначно определяющих ориентацию вектора солнечного излучения относительно системы координат привязанной к станции. Кроме того в «наземной» программе ограничены углы отклонения по третьей координате.

В реальных условиях для управления движением платформ по трем координатам априорное знание параметров эклиптики может не понадобится. Для этого достаточно применение в системе управления датчиков MDL. Другое принципиальное обстоятельство касается, собственно, кинематической схемы подвижной платформы и ее конструктивной реализации.

Если сравнить кинематические схемы подвижных платформ, приведенные на рис.9 (пиктограммы в верхней части рисунка), то можно видеть, что «космическая» платформа не отвечает, так называемому, принципу «не коммутативности» перемещений.

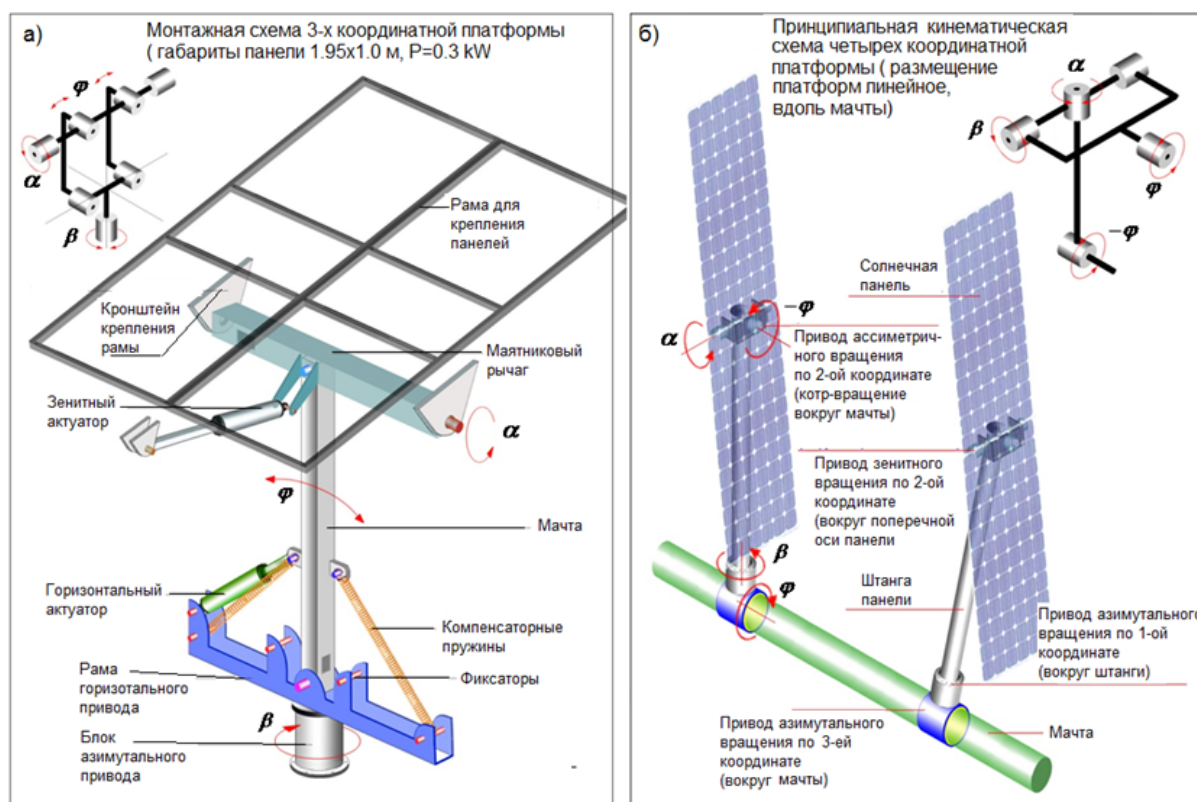


Рис. 9. Трех координатная кинематическая схема платформ:
а) для наземных установок, б) для космической станции.

Иначе, для того, чтобы обеспечить плоскопараллельное перемещение панелей, вращение по третьей координате должно происходить в плоскости перпендикулярной продольной плоскости панели (вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось панели, занявшей оптимальное положение по углу). А показанная кинематическая схема обеспечивает вращение только в плоскости перпендикулярной оси мачты. Такие перемещения позволяют нормализовать

плоскость панели к вектору излучения, но при этом контуры плоскостей панелей не будут параллельны друг другу. А это в свою очередь приведет к усложнению процедур вычисления проекций (для определения площадей теней), и как следствие, возрастанию времени получения решения. Более того, нельзя однозначно утверждать, что возможно полное исключение теней при не плоскопараллельных перемещениях панелей.

Условиям нормализации по углу и, одновременно, параллельности контуров плоскостей панелей при перемещениях по третьей координате отвечает только кинематическая схема на рис.9а. Отметим, что отклонение штанги на угол φ при ориентации плоскости панели возникает под воздействием силы гравитации и для реализации процесса управления достаточно опустить центр тяжести верхней части платформы ниже метacentра и сбалансировать ее. Поскольку, в условиях космоса гравитация практически отсутствует, то возникает необходимость соответствующей конструктивной модификации поворотных механизмов. Эти особенности приводят к следующим важным следствиям:

Следствие 1. Необходимо проводить оценку затрат на реализацию тех или иных конструктивных решений поворотных приводов и исполнительных механизмов и сопоставлять эти затраты с достигаемыми преимуществами.

Следствие 2. Управление по третьей координате возможно лишь в режиме реального времени для каждой пары углов вектора солнечного излучения. Поэтому, на время решения оптимизирующей задачи (определение углов φ_k и их знаков) накладываются жесткие ограничения. Для наземных установок, включающих от 7-ми до 13-ти платформ, в которых корректирующие управления выполняются, например, через 2 градуса (или 480 секунд) по азимутальному углу, это время не превышает 10-20 секунд.

Нужно отметить, что однорядную схему размещения платформ (рис.10) на мачте космической станции, можно рассматривать как частный случай многорядной схемы расположения панелей наземной солнечной электростанции (рис.11). Поэтому, разработанный метод оптимизации «по тени» для наземных станций может быть использован без каких бы то принципиальных изменений с учетом требований вытекающих из следствий 1 и 2.

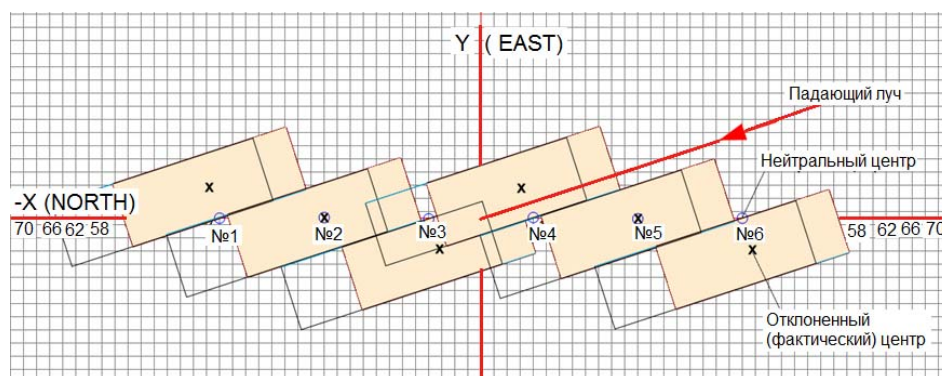


Рис. 10. Оптимальная ориентация «по углу» и «по тени» для заданного вектора солнечного излучения для установки на космической станции при 3-х координатной системе управления.

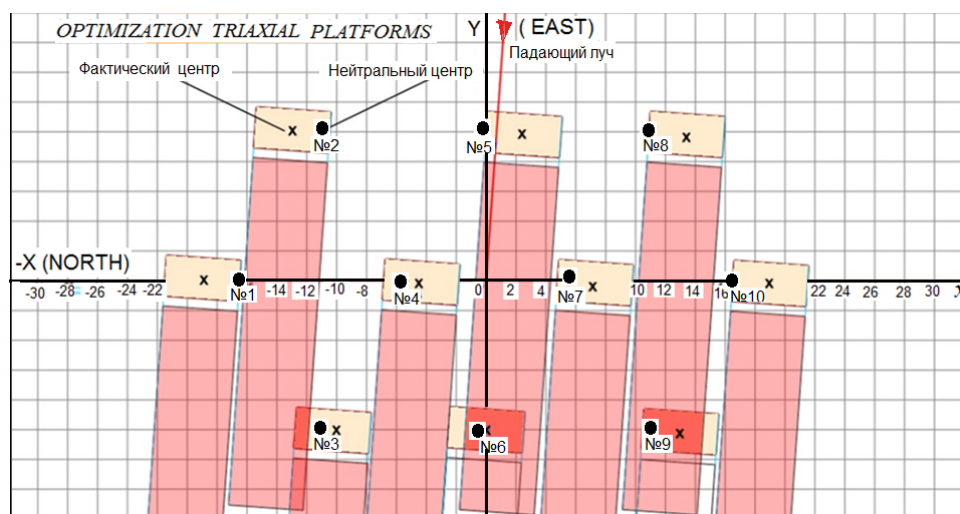


Рис.11. Оптимальная ориентация «по углу» и «по тени» для заданного вектора солнечного излучения для наземной установки при 3-х координатной системе управления.

Необходимость управлений по третьей координате возникает лишь в определенном диапазоне азимутальных и зенитных углов $\{\alpha_{sum}; \beta_{sum}\}$. Диапазоны изменения этих углов (критических углов) в полной мере зависят от геометрических параметров установки (дистанций между штангами платформ, габаритными размерами панелей и др.), а также от параметров орбитальной эклиптики.

Поскольку, как указывалось выше, выполнить полный цикл расчетов без знания параметров орбитальной эклиптики нельзя, мы приводим здесь лишь сравнительные результаты расчетов для одного из критических углов $\{\alpha_{kr} = 68; \beta_{kr} = 72\}$.

На рис. 10 приведен «скриншоте» с программных приложений, на котором показано, 6 панелей размером 10×30 м, размещенных на мачте с дистанцией 16 метров (однорядная система платформ). Установлено, что эффективность при данном критическом угле вектора излучения составляет соответственно 55.126% для 2-х координатной системы и 94.541% для 3-х координатной системы управления. Поскольку в обоих случаях имеет место оптимизация по углу (плоскости панелей нормальны к вектору излучения), то такая разница полностью обусловлена не оптимальностью «по тени».

Отметим, что программное приложение для расчета эффективности производства энергии было разработано для случая исследования наземных солнечных установок, для которых предельный угол горизонтального отклонения $\varphi_{пр}$ ограничен. Это обусловлено тем обстоятельством, что в условиях гравитации значительные отклонения данного угла будут приводить к росту затрат энергии на управления. В условиях космоса, данный угол может быть увеличен и, таким образом, представляется возможным полное исключение теней в критических зонах.

Поскольку нам неизвестны параметры орбитальной эклиптики, то выполнить сравнительные расчеты эффективности по «тени» не представляется возможным, даже принимая некоторые условные исходные данные. Тем не менее, можно выдвинуть вполне реальную гипотезу, что энергетическая эффективность установки возрастет при использовании 3-х координатных систем управления.

Следует учитывать и практическую значимость проблемы исключения теней на элементах генерирующих систем в условиях космоса. Образование теней приводит к возникновении значительных температурных градиентов между освещенными и затененными участками панелей. Возникающие, при этом термические деформации будут приводить к более интенсивному старению активных и конструктивных элементов энергетической установки, вплоть до отказов связанных с их механическим разрушением. Это приводит к ухудшению параметров надежности и долговечности системы энергоснабжения и необходимости проведения дорогостоящего ремонта.

Выводы

1. Оптимизация ориентирования солнечных панелей в направлении солнца позволяет увеличить объем производимой электрической энергии, как наземными установками, так и установками, работающими в космосе.
2. Разработаны математические модели для получения параметров «наземной» эклиптики для любого заданного момента времени, а также разработана относительно точная математическая модель, учитывающая сидерические сутки (так называемое «уравнение времени»). Установлено, что в практических вычислениях, без существенных погрешностей, можно применять диаграммы Купера.
3. Разработаны математические модели, алгоритмы и численные методы решения оптимизационной задачи управления ориентацией подвижных платформ с PV модулями по третьей координате, причем, в жестко регламентированном режиме реального времени.
4. Разработаны *специальные программные приложения* для параметрического анализа эффективности работы генерирующих установок как наземного, что имеет значение для большой энергетики, так и космического базирования. Использование данного подхода позволяет уменьшить площадь участка монтажа наземной солнечной электростанции той же мощности почти в три раза [13], например, с 2052 м^2 до 660 м^2 . Коэффициент

компактности размещения PV модулей увеличивается в данном случае с 0,195 до 0.606.

5. Предложены конструктивные изменения кинематической схемы стандартных двух координатных платформ, что позволило реализовать способ трех координатного управления подвижных платформ как наземного, так и космического базирования, что и определяет новизну полученных результатов.
6. При наличии математической модели «космической» эклиптики, можно адаптировать разработанные программные приложения для использования в качестве одного из инструментов проектирования солнечных энергетических установок космических станций.

Литература (References)

- [1] Cooper P.I. The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, 1969, Vol. 12, pp. 333-346.
- [2] Obozov A.D. Botpaev R.M. *Vozobnovliaemye istochniki energii* [Renewable energy sources]. Bishkek, 2010.
- [3] Pierluigi Guerriero, Fabio Di Napoli, Vincenzo d'Alessandro, Santolo Daliento. [Accurate Maximum Power Tracking in Photovoltaic Systems Affected by Partial Shading]. *International Journal of Photoenergy*. Volume 2015 (2015), Article ID 824832, 10 pages. (In English). Available at: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2015/824832/abs/>
- [4] Raushenbax G. *Spravochnik po proektirovaniu solnechnix batarei* [Guide to the design of solar panels]. Moskva, Energoatomizdat, 1983.
- [5] Falbel, G.; Puig-Suari, J.; Peczalski, A. [Sun oriented and powered, 3 axis and spin stabilized cubesats]. *Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, Mar. 9-16, 2002.* (In English).
- [6] Kim, T.Y.; Ahn, H.G.; Park, S.K.; Lee, Y.K. A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation. *Proceedings of ISIE, Pusan, Korea, Jun. 12-16, 2001.*
- [7] Abdallah, S.; Nijmeh, S. Two axes sun tracking system with PLC control. *Energ. Convers. Manage.* 2004, 45, 1931–1939.
- [8] Jhee Phong Lee, Nasrudin Abd. Rahim, Yusuf A. Al-Turki. [Performance of Dual-Axis Solar Tracker versus Static Solar]. *International Journal of Photoenergy* Volume 2013 (2013), Article ID 820714, 13 pages. (In English). Available at: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2013/820714/abs/>
- [9] Chia-Yen Lee, Po-Cheng Chou, Che-Ming Chiang, Chiu-Feng Lin. [Sun Tracking Systems: A Review]. Received: 14 April 2009; in revised form: 6 May 2009 / Accepted: 15 May 2009 / Published: 20 May 2009. (In English). Available at: <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/5/3875/htm>
- [10] *Konkurs NASA* [Contest NASA]. 2013. <https://habrahabr.ru/post/166861/>
- [11] Moiseev N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moskva, Izd. «Nauka», 1981. in Russian.
- [12] *Proekt 3-koordinatnoy eksperimental'noy ustanovki* [Three-dimensional experimental setup project] <http://bluebox-labs.com/>
- [13] DEGERenergie GmbH 2 axis trackers. *Specification.* <http://www.degerenergie.de/de/degertracker-zweiachsigsig.html>
- [14] Michalsky J.J. The astronomical almanac's algorithm for approximate solar position. *Sol. Energ.* 1988

Сведения об авторе.



Чалбаш Олег Халильевич. Институт энергетики Академии наук Молдовы. Доктор экономических наук. Основные направления исследований: Математическое моделирование. Разработка баз данных и математических методов и алгоритмов для моделирования процессов в различных предметных областях (в т. ч., в области управляемых электропередач). Системы управления солнечными энергетическими установками. Разработка систем управления двух- и трех координатными подвижными платформами для солнечных батарей. Программирование микропроцессорных плат. Проектирование оптимальных кинематических схем для привода подвижных платформ. Email: olegch0@yandex.ru