УДК 620.9+551.521

А.Н.Гаевская[1], А.Ю.Гаевский[2], докт.физ.-мат.наук (НТУУ "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского", Киев)

Разработка программного обеспечения для оптимизации параметров фотоэлектрических станций. I. Угол наклона и азимут солнечных панелей

Разработан алгоритм и программное обеспечение для оптимизации угла наклона и ориентации солнечных панелей фотоэлектрических станций (ФЭС) в заданном регионе и для определенного календарного рабочего периода. Математическая модель основана на нахождении максимума теоретического выражения для полной суммы радиации на наклонной поверхности, зависящей от наклона и ориентации панелей, а также от солнечных углов для каждого часа рабочего периода. В качестве параметров в выражении присутствуют экспериментальные почасовые данные для сумм радиации на горизонтальной поверхности, предоставляемые метеорологическими станциями. Преобразование к данным на наклонную поверхность осуществляется на основе анизотропных моделей солнечной радиации Хея-Девиса, Рейндла и Ключера. Для автономных ФЭС рассмотрено влияние электрической нагрузки и ограниченной емкости аккумуляторной батареи на величину оптимальных углов наклона и азимута. В работе приведены результаты расчета для нескольких регионов и типичных календарных рабочих периодов ФЭС. Библ. 13, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: *фотоэлектрические станции (ФЭС), фотоэлектрические модули, солнечная радиация, сумма радиации, инсоляция, анизотропные модели радиации, оптимизация наклона и ориентации, выработка электроэнергии ФЭС.*

Orcid: [1]0000-0001-7760-6789; [2]0000-0001-6144-2441

1. Введение и постановка задачи. Использование возобновляемых источников электрической энергии, особенно солнечной радиации, демонстрирует в последние годы значительный рост во всем мире и в Украине. Эффективная генерация фотоэлектрическими станциями (ФЭС) возможна лишь при правильном подборе электронного оборудования, фотоэлектрических модулей (ФМ) и их установочных параметров. К последним относятся, в первую очередь, геометрические параметры, определяющие расположение рядов ФМ: углы наклона, азимутальная ориентация, межрядные расстояния. Панели ФМ располагаются, как правило, под фиксированными углами наклона и азимута, значения которых определяют в итоге приход радиации (инсоляцию) за календарный период работы ФЭС и, следовательно, суммарную выработку электроэнергии.

Оптимизация углов наклона и ориентации приемных поверхностей актуальна как для ФМ, так и для солнечных коллекторов (см., например, [1–4]). К решению этой задачи возможны два основных подхода: экспериментальное определение оптимальных геометрических параметров [5, 6] и теоретические расчеты с использованием тех или иных моделей солнечной радиации [2, 4, 7, 8]. В данной работе в рамках второго подхода разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее находить оптимальные углы приемных поверхностей для любого региона и рабочего периода ФЭС. В основе расчета может лежать одна из моделей солнечной радиации, оперирующая с такими экспериментальными данными, как усредненные почасовые значения прямой радиации на горизонтальную поверхность и на поверхность, нормальную к солнечным лучам, а также значения диффузной радиации на горизонтальную поверхность и значения отражательной способности (альбедо) земной поверхности. Чаще всего для оценки оптимальных углов наклона ФМ и выработки ФЭС используется изотропная модель Лю-Джордана [1, 8, 9]. В разработанном нами ПО были использованы анизотропные модели Хея-Девиса, Рейндла и Ключера [7, 9, 10], которые, как показал дальнейший расчет, дают небольшой разброс значений годовой инсоляции на наклонной поверхности для регионов Украины.

© А.Н.Гаевская, А.Ю.Гаевский, 2017

Суммарная выработка электроэнергии ФЭС непосредственно зависит от инсоляции E_T на наклонную поверхность ФМ за рассматриваемый рабочий период. Последняя в рамках рассматриваемых моделей есть функция угла наклона β, азимутального угла z_d рядов фотомодулей и рабочего периода τ станции:

$$< E_T >= f(\beta, z_d, \tau) = \frac{1}{N_\tau} \times \\ \times \int_\tau I_T \left[\beta, z_d, \phi(t), z(t), h(t), Lat, Long\right] dt, \quad (1)$$

где N_τ – продолжительность рабочего периода; I_T – интенсивность радиации на наклонной поверхности в заданном географическом районе, кВт/м^2. Эта подынтегральная функция зависит от названных выше фиксированных углов панелей β и z_d, а также от зенитного угла $\phi(t)$, азимута $z(t)$ и часового угла $h(t)$ солнца, которые меняются в течение дня, и их значение зависит от номера дня в году. В качестве констант в I_T присутствуют широта Lat и долгота $Long$ места расположения ФЭС.

Интегрирование в выражении (1) выполняется по всему рабочему периоду, причем нами учитываются все возможные ситуации расположения солнца относительно горизонта (в том числе, когда солнце ниже горизонта, но радиация имеется) и относительно плоскости солнечных панелей (в том числе, когда солнце светит на тыльную сторону панелей). $< E_T >$ формуле (1) есть фактически усредненное значение инсоляции (кВт·ч/м^2), т.е. суммы радиации, которую получает единица площади приемной поверхности за один день рабочего периода τ. Подынтегральная функция $I_T(\beta, z_d \beta, z_d, \phi, z, h, Lat, Long)$ имеет аналитический вид, определяемый той или иной моделью радиации. В качестве параметров в I_T присутствуют интерполяционные поминутные (либо четвертьчасовые) значения различных компонент радиации – они в списке аргументов не указаны. Интерполяция выполняется на основе почасовых экспериментальных значений инсоляции на горизонтальную плоскость для того или иного месяца, т.е. на основе данных, обычно публикуемых в справочниках (например, [11]) или в открытых для доступа глобальных метеосайтах (например, [12]).

В данной работе создан пакет программ на языке MATLAB для оптимизации функционала (1) по β и z_d, позволяющий вычислять оптимальные углы наклона и азимута солнечных панелей для любого рабочего периода и любого региона, для которого имеются относительно полные радиационные данные за продолжительный (многолетний) период времени. Именно такого рода данные гарантируют, на наш взгляд, адекватность получаемых оценок оптимальных углов β_{opt} и $z_{d,opt}$.

2. Модели радиации и алгоритм расчета. Углы наклона и азимута фотомодулей ФЭС – это конструктивные параметры, изменение которых практически не требует дополнительных материальных затрат. Поэтому вычисление оптимальных значений этих углов является целесообразным на стадии проектирования ФЭС. Наклон панелей β определяется как угол между приемной поверхностью ФМ и горизонтальной плоскостью, а азимут z_d ФМ определяется углом проекции нормали к приемной поверхности на горизонтальную плоскость, который отсчитывается от плоскости меридиана. При этом азимут считается положительным при отсчете от направления на юг по часовой стрелке. Эти углы будем считать фиксированными, и они должны быть таковы, чтобы обеспечивался максимум прихода радиации на единицу площади приемной поверхности в течение рабочего периода ФЭС.

Интенсивность радиации I_T, кВт /м^2, на наклонной поверхности представляется в виде [9]:

$$I_T = I_B R_B + I_D R_D + \rho\left(I_B + I_D\right)\frac{1-\cos\beta}{2}. \quad (2)$$

Здесь первое слагаемое описывает прямую радиацию, второе – диффузную (рассеянную) радиацию, а последнее – отраженную радиацию. Величины I_B и I_D в (2) – интенсивности прямой и диффузной компонент радиации на горизон-

тальной плоскости, определяемые из справочных данных; ρ – земное альбедо (считаем, что вблизи ФЭС возвышающегося ландшафта или строений нет). Прямая и диффузная компоненты определяются через радиацию на горизонтальную плоскость с помощью коэффициентов пересчета на наклонную поверхность: $R_B = \dfrac{\cos\theta}{\cos\phi}$ – для прямой радиации и R_D – для диффузной радиации. Здесь ϕ – зенитный угол, а θ – угол падения (угол между нормалью к приемной поверхности и направлением на солнце), определяемый известными формулами [1, 9].

Коэффициент R_D вычисляется не столь просто как коэффициент R_B, задаваемый геометрическим соотношением. Для вычисления R_D необходимо использовать ту или иную модель радиации, согласно которой диффузную компоненту радиации на наклонной плоскости можно будет выразить через горизонтальные компоненты I_B и I_D. Мы проанализируем в данной работе три модели радиации, относящиеся к анизотропным моделям, т.е. моделям, которые учитывают неоднородность рассеянного излучения от небосвода. Это модели Хея-Девиса (Hay-Davies), Рейндла (Reindl) и Ключера (Klucher), согласно которым коэффициент транспозиции R_D определяется следующим образом [9, 10]:

$$R_D^{Hay-Davies} = AR_B + (1-A)R_D^{iso},\ A = \frac{I_{Bn}}{I_{0n}}, \quad (3а)$$

$$R_D^{Reindl} = AR_B + (1-A)R_D^{iso}\left(1 + f_R \sin^3\frac{\beta}{2}\right), \quad (3б)$$

$$A = \frac{I_B}{I_0},\ f_R = \sqrt{\frac{I_B}{I_G}},$$

$$R_D^{Klucher} = R_D^{iso}\left(1 + f_K \cos^2\theta \sin^3\phi\right)\times$$

$$\times\left(1 + f_K \sin^3\frac{\beta}{2}\right), f_K = 1 - \left(\frac{I_D}{I_G}\right)^2, \quad (3в)$$

где $R_D^{iso} = \left(1+\cos\beta\right)/2$ – коэффициент транспозиции изотропной модели [1]; A – индекс анизотропии, который интегральным образом описывает анизотропную составляющую диффузной радиации, остальная часть диффузной радиации в модели Хея-Девиса рассматривается как изотропная. Величины I_{Bn} и I_{0n} в (3а) – нормальные компоненты прямой радиации на приемной поверхности и на верхней границе атмосферы. Слагаемые с коэффициентами f_R в модели Рейндла (3б) и f_K в модели Ключера (3в) описывают вклад от просветления горизонта, который сильно зависит от угла наклона ($\sim \sin^3\dfrac{\beta}{2}$). Кроме того, в модели Ключера имеются компоненты с $f_K \cos^2\theta \sin^3\phi$, отвечающие рассеянному излучению от солнечного диска.

Отметим, что на эксперименте чаще вместо интенсивностей радиации измеряются приходы радиации в определенные промежутки времени, поэтому интеграл (1) заменяется на соответствующие суммы по часовым отсчетам. В течение светового дня солнце может освещать как лицевую, так и тыльную сторону ФМ (преимущественно в летние дни). Условием перехода солнца с тыльной стороны ФМ на лицевую (в утренние часы) и обратно (в вечерние часы) является равенство $\cos\theta = 0$ или

$$\operatorname{tg}\phi\cos(z - z_d) = -\operatorname{ctg}\beta. \quad (4)$$

Если вместо равенства (4) имеем неравенство "<", это означает, что солнце освещает только тыльную сторону и прямая радиация отсутствует, если же справедливо неравенство ">", то присутствуют все три компоненты радиации.

Схема алгоритма расчета оптимальных углов β_{opt} и $z_{d,opt}$ показана на рис. 1. На этой схеме используются обозначения: Φ_{mj}, z_{mj} – зенитный и азимутальный углы солнца; ΔE_{mj} – инсоляция за временной интервал j усредненного дня месяца m; N_s – количество временных интервалов в течение суток, для которых выполняется интерполяция по экспериментальным данным; t_0 – начальное время экспериментальных отсчетов для данного региона; t_{noon} – локальное время солнечного полдня ($z = 0$).

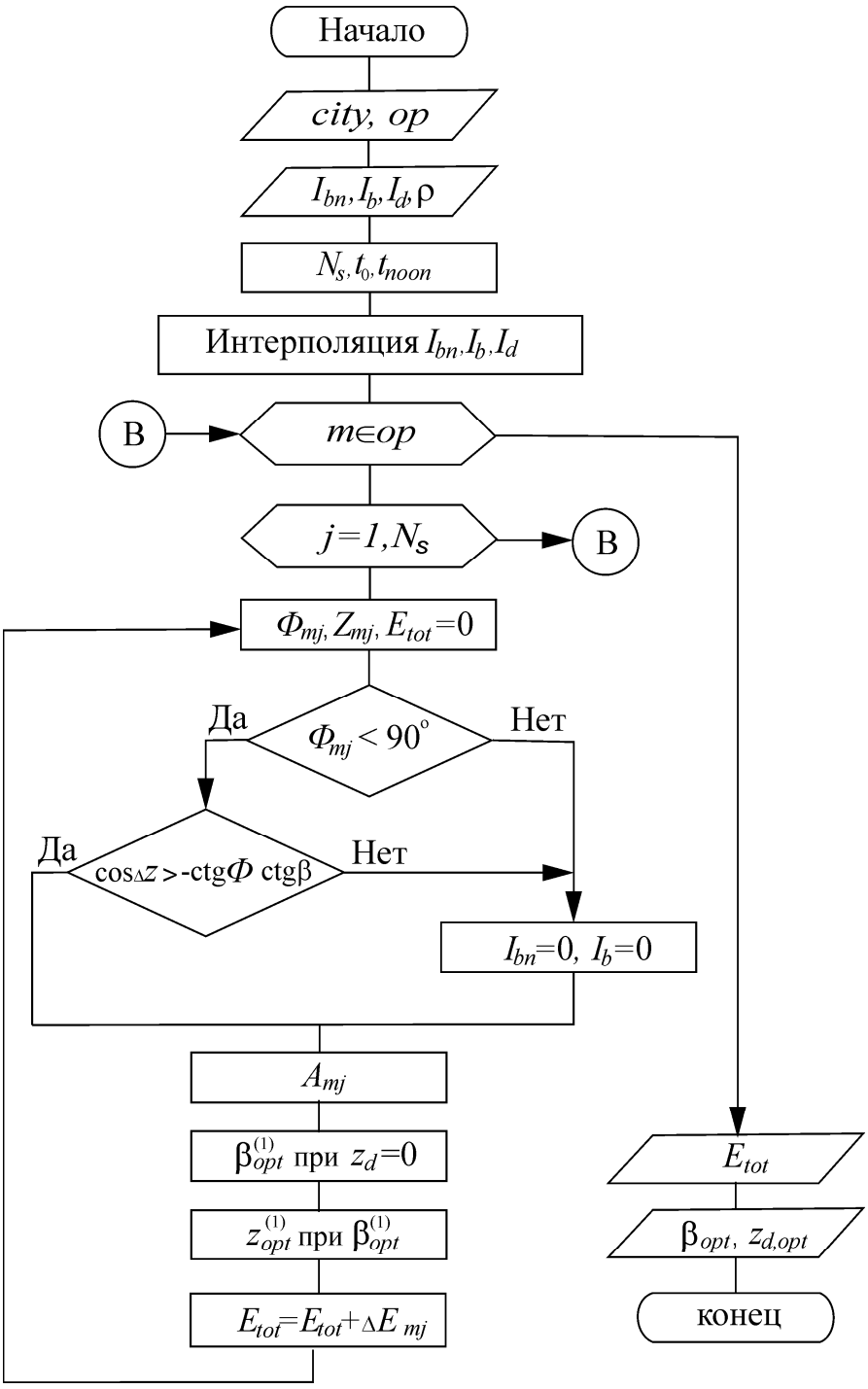


Рис. 1. Блок-схема алгоритма вычисления β_{opt} и $z_{d,opt}$ для города "city" и рабочего периода "op".

В работе в качестве примера рассчитаны оптимальные углы наклона и азимута для трех городов: Киева, Одессы и Евпатории. Были использованы усредненные за много лет значения почасовых сумм радиации и были заданы чаще всего встречающиеся на практике рабочие периоды: лето (месяцы 6-8), весна-лето-осень (месяцы 3-11) и весь год. Результаты расчета углов и среднесуточной суммы радиации за рабочий период приведены в таблице 1. Расчеты были выполнены с использованием трех названных выше моделей диффузной радиации.

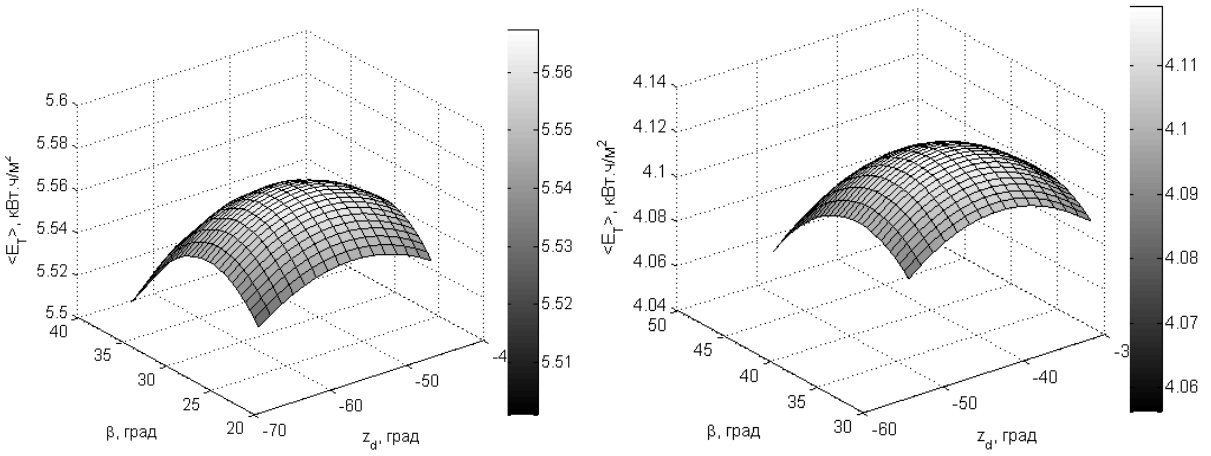
Таблиця 1. Оптимальные углы β_{opt}, $z_{d,opt}$ (град) и среднесуточная сумма радиации E_{tot} (кВт·ч/м²)

Город	Раб. период*)	Hay-Davies			Reindl			Klucher		
		β_{opt}	$z_{d,opt}$	E_{tot}	β_{opt}	$z_{d,opt}$	E_{tot}	β_{opt}	$z_{d,opt}$	E_{tot}
Киев	P_1	20,4	–10,7	5,61	20,5	–10,5	5,87	19,0	–11,0	6,09
	P_2	31,7	–5,8	4,19	32,0	–5,5	4,34	31,5	–6,0	4,51
	P_3	35,7	–3,8	3,53	37,2	–3,8	3,64	35,0	–3,8	3,77
Одесса	P_1	18,9	–13,0	6,43	18,7	–12,3	6,69	17,3	–14,0	6,89
	P_2	29,5	–5,5	4,88	30,2	–5,7	5,03	29,2	–6,0	5,20
	P_3	32,6	–3,5	4,09	33,7	–3,7	4,20	32,5	–3,8	4,35
Евпатория	P_1	17,3	–1,0	6,27	17,3	–1,0	6,51	15,8	–1,3	6,71
	P_2	30,4	–0,5	4,95	31,2	–0,5	5,09	29,7	–0,5	5,26
	P_3	33,6	0,3	4,22	34,7	0,2	4,32	33,6	0,5	4,65

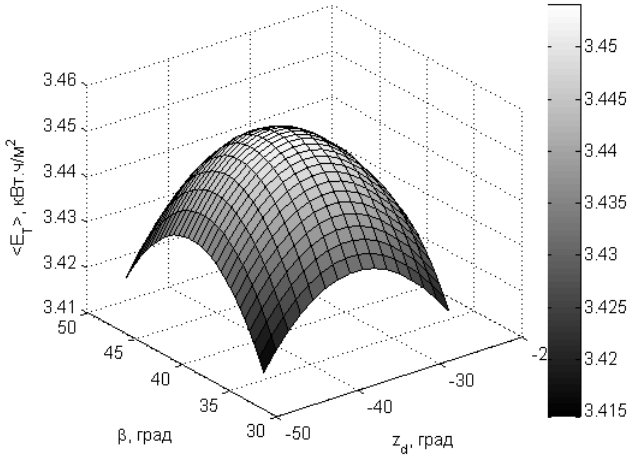
*) P_1 – лето (июнь - август); P_2 – "кроме зимы" (март - ноябрь); P_3 – весь год

Как видно из таблицы, различие в расчетах β_{opt} в рамках рассмотренных анизотропных моделей составляет не более 1,5 градуса для всех городов и рабочих периодов (кроме периода P_3 для Киева). Более высокие значения для β_{opt} в большинстве случаев дает модель радиации Рейндла, меньшие – модель Ключера. Относительный разброс значений β_{opt} для городов Украины укладывается в интервал до 8%, что говорит в пользу хорошей воспроизводимости результатов, получаемых с помощью разработанного ПО.

Исследование формы поверхности E_{tot} в области максимума (β_{opt}, $z_{d,opt}$) (рис. 2) показало, что отклонение угла наклона от оптимального значения на 6-7% может приводить к недобору инсоляции и соответственно выработки электроэнергии порядка 3%. Правильная ориентация панелей по азимуту приводит к увеличению суммы радиации за летний период примерно на 1-2% по сравнению с ориентацией строго на юг (z_d = 0).



а б



в

Рис. 2. Графики среднесуточной инсоляции (кВт·ч/м^2) для г. Киева в зависимости от угла наклона и азимута приемной поверхности (в градусах) при различных рабочих периодах: *а – Р1; б – Р2; в – Р3 (см. примечание к табл. 1).*

3. Учет нагрузки и уровня генерации. При проектировании автономных ФЭС необходимо определять оптимальный угол наклона с учетом временного профиля нагрузки. Действительно, в летние дни генерация ФМ может оказаться избыточной, если аккумуляторная батарея заряжена и если для поддержания нагрузки достаточно меньшей генерации. В работе [13] была предложена методика расчета ФЭС на основе баланса энергии и получены усредненные зависимости энергии заряда аккумуляторов для заданных профилей генерации и потребления в течение рабочего периода. Обычно число компонент автономной ФЭС (фотомодулей и аккумуляторов) определяется из условия обеспечения надежной работы ФЭС в неблагоприятные дни (например, в зимние месяцы). При этом, как показывает расчет [13], в летние месяцы генерация является избыточной при профилях нагрузки, характерных для большинства индивидуальных потребителей. Поэтому инсоляцию на наклонные поверхности в летний период целесообразно уменьшить за счет увеличения угла наклона. Это благоприятно скажется на приходе радиации в остальные месяцы рабочего периода.

В описываемом нами ПО это выполнено путем ограничения величины E_{tot} на определенном уровне $E_{tot,\text{bound}}$ и последующего расчета оптимальных углов наклона и азимута. Верхняя граница $E_{tot,\text{bound}}$ должна определяться в ходе расчета конкретной ФЭС. В таблице 2 приведены результаты оптимизации с использованием радиационной модели Ключера для различных значений $E_{tot,\text{bound}}$ и рабочего периода "весь год".

Таблица 2. Оптимальные углы наклона ФМ при разных граничных уровнях инсоляции $E_{tot,\text{bound}}$

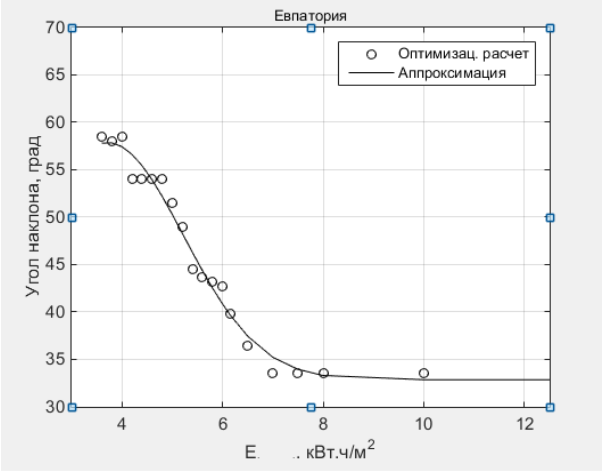
$E_{tot,\text{bound}}$, кВт·ч/м^2	Оптимальный угол наклона β_{opt}, град.		
	Киев	Одесса	Евпатория
3,6	65,5	63,0	58,5
3,8	58,0	63,0	58,0
4,0	55,8	54,5	58,5
4,2	55,1	54,5	54,0
4,4	53,0	54,5	54,0
4,6	53,0	54,8	54,0
4,8	51,1	54,8	54,0
5,0	51,1	54,2	51,5
5,2	49,2	49,0	49,0
5,4	43,2	49,0	44,5
5,6	42,8	49,0	43,7
5,8	42,8	47,4	43,2
6,0	38,8	45,0	42,7
6,2	37,4	42,2	39,8
6,5	35,5	38,3	36,5
7,0	35,5	33,0	33,5
7,5	35,5	32,8	33,5
10	35,5	32,2	33,5

График зависимости β_{opt} от ограничения $E_{tot,\text{bound}}$, полученный путем аппроксимации по МНК пар значений из табл. 2 для г. Евпатории, показан на рис. 3а. В качестве аппроксиманты была выбрана функция:

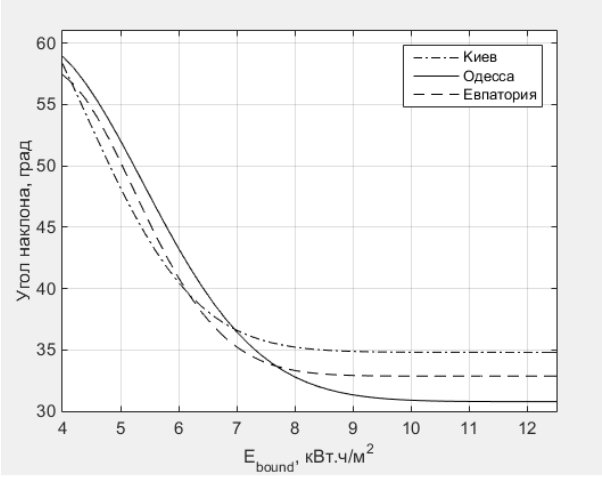
$$\beta_{opt}(x) = a_1 \exp\left[-a_2 (x - a_3)^2\right] + a_4, \qquad (5)$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4 > 0$.

Эта модельная функция отвечает характеру полученных зависимостей таблицы 2. Результаты аппроксимации зависимостей $\beta_{opt}\left(E_{tot,\text{bound}}\right)$ для рассматриваемых трех городов и круглогодичной работы ФЭС приведены на рис. 3б.



а



б

Рис. 3. Зависимости оптимального угла наклона β_{opt} от ограничения $E_{tot,\text{bound}}$: *а – результаты оптимизационного расчета (о) и аппроксимирующая функция (5) (сплошная линия); б – модельные зависимости $\beta_{opt}\left(E_{tot,\text{bound}}\right)$ для трех городов.*

Как видно из полученных кривых на рис. 3б, при отсутствии ограничений (большие значения $E_{tot,\text{bound}}$) углы наклона совпадают с оптимальными значениями из таблицы 1. По мере ужесточения ограничения (уменьшения $E_{tot,\text{bound}}$) величина оптимального угла наклона панелей увеличивается нелинейным образом.

4. Результаты и выводы. В настоящей статье предложен алгоритм и ПО для оптимизации угла наклона фотоэлектрических модулей, которые используют усредненные многолетние данные относительно сумм солнечной радиации для конкретных регионов. На основе анизотропных моделей рассеянной радиации и разработанного численного алгоритма рассчитывается средний приход радиации за один день рабочего периода ФЭС. Данный метод позволил при расчете учесть ограничение на максимальный уровень генерации в благоприятные солнечные дни, который вытекает из ограниченного уровня нагрузки и конечной емкости аккумуляторной батареи.

В качестве примера приведены результаты расчета оптимальных углов наклона и азимута для трех городов и трех календарных периодов работы ФЭС, хотя никаких ограничений на выбор рабочего периода разработанный метод не имеет. Расчет оптимальных углов может быть также проведен для любого географического места, для которого имеются необходимые экспериментальные данные о почасовых значениях прихода радиации. Возможно также использование менее подробных данных, например, среднесуточных значений инсоляции, однако точность результатов при этом будет ниже. Как показано в работе, значения β_{opt}, вычисленные с использованием различных анизотропных моделей, составляют не более 1,5 градуса для всех городов и рабочих периодов, что говорит в пользу надежности получаемых данным методом результатов.

На практике солнечные панели, как правило, ориентируются на юг и устанавливаются под углом наклона, определяемым с помощью весьма приближенных соотношений через широту места [1, 3]. Оптимизация углов z_d и β, как показывают наши расчеты, позволяет увеличить на 2-3%

приход радиации и соответственно нарастить выработку электроэнергии по сравнению с ориентацией панелей строго на юг и возможным отклонениям β от оптимального значения на 5-7 градусов. При мощности станции 1 МВт это позволит получать ежедневно дополнительно порядка 100 кВт·ч электроэнергии сравнительно с неоптимизированным вариантом ФЭС.

Отдельного рассмотрения требует вопрос ограничения генерации электроэнергии фотомодулями автономной ФЭС. В благоприятные, как правило, летние дни генерация может оказаться избыточной ввиду ограниченной нагрузки и высокого уровня заряда аккумуляторной батареи. Поэтому при определении оптимального наклона модулей необходимо исходить не из условия получения максимума радиации за весь рабочий период, а из критерия, который предполагает уменьшение прихода радиации в летние месяцы и увеличение в более неблагоприятные месяцы. Это вносит, как показано в работе (см. рис. 2), существенную корректировку в большую сторону для значений оптимальных углов наклона. Формулировка условия ограничения среднесуточного прихода радиации должна определяться из уравнений энергетического баланса и перетока мощности между компонентами автономной ФЭС [13].

1.*Даффи Дж.А.* Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман – М.: Мир, 1977. – 420 с.

2.*Lewis G.* Optimum tilt of solar collectors / G. Lewis // Solar and Wind Technology. – 1978. – v. 4. – p.407–410.

3.*Tang R.* Optimal tilt-angles for solar collectors used in China / R. Tang, T. Wu // Appl Energy. – 2004. – v.79. – p. 239–248.

4.*Calabrò E.* An Algorithm to Determine the Optimum Tilt Angle of a Solar Panel from Global Horizontal Solar Radiation / E. Calabrò // Hindawi Publishing Corporation, Journal of Renewable Energy. – 2013. – v. 2013. – Article ID 307547. – 12 pages.

5.*Koronakis P.* On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area / P. Koronakis // Sol Energy. – 1986. – v.36. – p. 217–225.

6.*Kaldellis J.* Experimental investigation of the optimum photovoltaic panel's tilt angle during the summer period / J. Kaldellis, D. Zafirakis. // Energy. – 2012. – v. 38. – p. 305–314.

7.*Loutzenhiser P.G.* Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation /P.G. Loutzenhiser, H. Manz et al.//Solar Energy. – 2007. – v. 81. – p. 254–267.

8.*Гаевский А.Ю.* Определение оптимальных углов наклона фотоэлектрических панелей/ А.Ю. Гаевский, О.В. Ушкаленко// Відновлювана енергетика. – 2016. – №1 (44). – С. 21–27.

9.*Kalogirou, S. A.* Solar Energy Engineering: Processes and Systems . – London: Academic Press, 2009 – 760 p.

10. *Noorian A.M.* Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces /Ali M.Noorian, I. Moradi, G. Ali Kamali //Renewable Energy. – 2008. – v.33. – p. 1406–1412.

11. *Справочник по климату СССР.* Украинская ССР. Часть I. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние //Ленинград: Гидрометеорологическое изд. – 1966. – 126 с.

12. *NASA Surface* meteorology and Solar Energy: Methodology [Электронный ресурс] https://www.ceoe.udel.edu/File%20Library/Research/Wind%20Power/SSE_Methodology.pdf.

13. *Гаевский А.Ю.* Оптимизационный расчет автономной фотоэлектрической станции / А.Ю. Гаевский, О.В. Ушкаленко // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – №15. – 16 – С. 179 – 180.

REFERENCES

1.Duffie J.A. Solar Engineering of Thermal Processes. 3d Edition/J.A.Duffie, W.A. Beckman.–N.Y.: John Wiley and Sons, 2006. – 928 p.

2.Lewis G. Optimum tilt of solar collectors / G. Lewis // Solar and Wind Technology. - 1978. - v. 4. – p.407-410.

3.Tang R. Optimal tilt-angles for solar collectors used in China / R. Tang, T. Wu // Appl Energy. – 2004. – v.79. – p. 239-248.

4.Calabr? E. An Algorithm to Determine the Optimum Tilt Angle of a Solar Panel from Global Horizontal Solar Radiation / E. Calabr? // Hindawi Publishing Corporation, Journal of Renewable Energy. – 2013. - v. 2013. - Article ID 307547. – 12 pages.

5.Koronakis P. On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area / P. Koronakis // Sol Energy. – 1986. – v.36. – p.217-225.

6.Kaldellis J. Experimental investigation of the optimum photovoltaic panel's tilt angle during the summer period / J. Kaldellis, D. Zafirakis. // Energy. – 2012. – v. 38. – p. 305-314.

7.Loutzenhiser P.G. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation /P.G. Loutzenhiser, H. Manz et al.//Solar Energy. – 2007. – v. 81. – p. 254–267.

8.Gaevskii A.Y. Determination of optimal angle of inclination of photovoltaic panels / A.Y. Gaevskii, O.V. Ushkalenko // VidnovlyuvanaEnergetica. - 2016. - No.1 (44). - p.21-27.

9.Kalogirou, S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems .– London: Academic Press, 2009 – 760 p.

10. Noorian A.M. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces /Ali M.Noorian, I.

Moradi, G. Ali Kamali //Renewable Energy. - 2008. - v.33. - p. 1406–1412.

11. Handbook on climate of USSR. Ukrainian SSR. Part I. Solar radiation, radiation balance and sunshine // Leningrad: HydrometeorologicalPubl. - 1966. - 126 p.

12. NASA Surface meteorology and Solar Energy: Methodology https://www.ceoe.udel.edu/File%20Library/Research/Wind%20Power/SSE_Methodology.pdf.

13. GaevskiyA.Yu. Optimization calculation of autonomous photovoltaic plant / A.Yu. Gaevskiy, O.V. Ushkalenko // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). - 2015.- No.15 - 16 - p. 179 - 180.

А.Н.Гаєвська, А.Ю.Гаєвський, докт.физ.-мат.наук
(НТУУ "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского", Киев)

Розробка програмного забезпечення для оптимізації параметрів фотоелектричних станцій.
I. Кут нахилу і азимут сонячних панелей

Розроблено алгоритм і програмне забезпечення для оптимізації кута нахилу і орієнтації сонячних панелей фотоелектричних станцій (ФЕС) в заданому регіоні і для певного календарного робочого періоду. Математична модель базується на знаходженні максимуму теоретичного вираження для повної суми радіації на похилій поверхні, залежить від нахилу і орієнтації панелей, а також від сонячних кутів для кожної години робочого періоду. В якості параметрів у виразі присутні експериментальні погодинні дані для сум радіації на горизонтальній поверхні, пріоритет надається метеорологічними станціями. Перетворення до даних на похилу поверхню здійснюється на основы анізотропних моделей сонячної радіації Хея-Девіса, Рейндль і Ключеров. Для автономних ФЕС розглянуто вплив електричного навантаження і обмеженої місткості акумуляторної батареї на величину оптимальних кутів нахилу і азимута. В роботі наведені результати розрахунку для декількох регіонів і типових календарних робочих періодів ФЕС. Бібл. 13, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: *фотоелектричні станції (ФЕС), фотоелектричні модулі, сонячна радіація, сума радіації, інсоляція, анізотропні моделі радіації, оптимізація нахилу і орієнтації, вироблення електроенергії ФЕС.*

Gaevskaya A., Gaevskii A. (NTUU "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv)

Development of software for PV plant parameters optimization.
I. The tilt and azimuth angles of solar panels

This paper proposes an algorithm and the software to optimize the tilt angle and azimuth orientation of solar panels in photovoltaic (PV) plants for a given region and operational period of time. The mathematical modeling is based on maximization of the theoretical expression for the total insolation on tilted surface with respect to the slope, panel orientation and solar angles for each hour of the operational period. The experimental hour irradiance data on horizontal surface, provided from meteorological stations, are presented as parameters in this expression. The conversion to the inclined surface irradiance values is performed on the framework of anisotropic Hay-Davies, Reindl and Klucher radiation models. For stand-alone PV plants the impact of electrical load and battery capacity constrain on the optimal slope and azimuth is considered. This paper presents the results of the angle calculation for a number of regions and typical operational periods of PV plants. References 13, table 2, figures 3.

Keywords*: PV plants, PV modules, solar radiation, irradiance, insolation, anisotropic radiation models, tilt angle optimization, azimuth orientation, PV energy yield.*

SYNOPSES

To obtain maximum power generation by PV plantthe following setting parameters of PV modulesare essential: tilt angles, azimuth orientation, distances between module rows. In this paper, thealgorithm and the program in MATLAB for optimizing the tilt angle and azimuth of receiving surfacesare . The mathematical model is based on maximization of the theoretical expression for the total sum of solar radiation on atilted surface. The experimental hourly data for irradiance on a horizontal surface provided by meteorological stations are used as parameters. Transposition to data on a tilted surface is carried out with aids of anisotropic radiation models of Hay-Davies, Reindle and Klucher. The program allows calculate the optimal angles for any calendar operational period and any region for which the long-term radiation data are available. For a stand-alone PV plant the influence of the electric load and the constrained battery capacity on the optimal tilt is considered. In the article the results of calculations for several regions and typical calendar operational periods are given.

Стаття надійшла до редакції 17.03.17
Остаточна версія 24.05.17