

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСОЛЯЦИИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ФОТОВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

В. С. Симанков, А. В. Шопин, П. Ю. Бучацкий

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

Майкопский государственный технологический институт, г. Майкоп

В статье рассматривается задача создания модели инсоляции для использования в системе автоматического управления фотоветроэнергетической системой. Приводится модель солнечной радиации на наклонную поверхность для безоблачного неба и обзор существующих моделей прогноза облачности.

Моделирование солнечной радиации (инсоляции) необходимо для проектирования и функционирования системы автоматического управления ФВЭС. Конечной целью моделирования является расчет зависимости сумм полной солнечной радиации на поверхность солнечных батарей от географической широты места, метеорологических факторов, дня года, времени суток и угла наклона поверхности [9].

Инсоляция представляет собой случайную величину. Обычно ее рассматривают как статистическое явление, развивающееся во времени согласно законам теории вероятностей. Последовательность результатов наблюдений представляет собой временной ряд, анализируя который можно получить стохастическую модель, позволяющую вычислить вероятность того, что некоторое будущее значение инсоляции будет лежать в определенном интервале, обладающую минимальным числом параметров и при этом адекватно описывающую исследуемый процесс.

Построение такой модели целесообразно разбить на две части:

- детерминированная часть расчета дневных сумм солнечной радиации для безоблачного неба (модель безоблачного неба)
- стохастическая часть определения коэффициента ослабления солнечной радиации облачностью (модель облачности)

Первая часть предназначена для расчета суточных сумм прямой и рассеянной солнечной радиации на горизонтальную поверхность при безоблачном небе. В этом случае искомая величина будет зависеть от коэффициента прозрачности атмосферы и ее оптической массы.

Модель безоблачного неба в настоящее время разработана достаточно хорошо [1]. Для расчета дневных сумм солнечной радиации на горизонтальную поверхность использована четырехфакторная модель. В качестве факторов приняты следующие параметры:

- географическая широта района моделирования (Θ);
- моделируемый номер дня года (n);
- характеристика запыленности атмосферы района моделирования - кол-во частиц пыли в одном куб. см. воздуха (m);
- характеристика влажности атмосферы района моделирования - кол-во осаждаемой воды (W), мм.

Величину дневной суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность для безоблачного неба ($Q_{возм}^{сум}$) можно вычислить из следующего выражения:

$$Q_{возм}^{сум} = \int_{t_{солн}^e}^{t_{солн}^3} [S_{возм}(t_{солн}) + D_{возм}(t_{солн})] dt_{солн}, \quad (1)$$

где $S_{возм}$ - прямая солнечная радиация на горизонтальную поверхность для безоблачного неба, Вт/м²·м; $D_{возм}$ - рассеянная солнечная радиация на горизонтальную поверхность для безоблачного неба, Вт/м²·м; $t_{солн}$ - истинное солнечное время, ч.; $t_{солн}^e$; $t_{солн}^3$ - истинное солнечное время восхода и захода Солнца, ч.

Прямую и рассеянную составляющие солнечной радиации на горизонтальную поверхность для безоблачного неба можно найти из выражений:

$$S_{возм} = K_{\Pi}^S \cdot C\Pi \cdot \text{Sin}A\ell; \quad (2)$$

$$D_{возм} = K_{\Pi}^D \cdot C\Pi \cdot \text{Sin}A\ell, \quad (3)$$

где K_{Π}^S - коэффициент пропускания атмосферы для прямой солнечной радиации при безоблачном небе; K_{Π}^D - коэффициент рассеивания солнечной радиации в атмосфере при безоблачном небе; $C\Pi$ - солнечная постоянная ($C\Pi = 1360 \text{ Вт/м}^2\text{м}$); $A\ell$ - угол высоты Солнца.

Коэффициенты K_{Π}^S и K_{Π}^D можно найти соответственно из выражений:

$$K_{\Pi}^S = A - B \cdot \omega - C \cdot m - D \cdot AM; \quad (4)$$

$$K_{\Pi}^D = E - F \cdot K_{\Pi}^S, \quad (5)$$

где ω - количество осаждаемой из атмосферы воды, мм., m - количество частиц пыли в 1 куб.см. атмосферы; AM - масса атмосферы;

A, F - эмпирические коэффициенты, значения которых приведены в табл.3.1

Параметр массы атмосферы, определяемый толщиной слоя атмосферы по пути следования солнечных лучей определяется через угол высоты Солнца:

$$AM = \frac{1}{\text{Sin}A\ell}. \quad (6)$$

Формула (6) не учитывает кривизны поверхности Земли и поэтому справедлива лишь для больших углов высоты Солнца. Для углов $A\ell$ меньше 7 град. была получена на основе аппроксимации соответствующей кривой следующая эмпирическая формула:

$$AM = 42,35(A\ell + 1)^{(-0,795)}. \quad (7)$$

Коэффициент корреляции составил минус 0,986.

Таким образом конечное выражение для вычисления массы атмосферы примет вид:

$$AM = \begin{cases} \frac{1}{\text{Sin}A\ell} & \text{при } A\ell > 7^\circ \\ 42,35(A\ell + 1)^{(-0,795)} & \text{при } A\ell \leq 7^\circ \end{cases} \quad (8)$$

Угол высоты Солнца $A\ell$ является величиной детерминированной, определяемой по выражению:

$$A\ell = \text{ArcSin}[\text{Sin}\theta\text{Sin}\delta + \text{Cos}\theta \cdot \text{Cos}\delta \cdot \text{Cosh}], \quad (9)$$

где θ - широта местонахождения точки моделирования, град.;

δ - склонение Солнца;

h - часовой угол, град.

Величины склонения Солнца и часового угла можно найти соответственно из выражений:

$$\delta = 23,5\text{Sin}[360^\circ + (284 + n)/365]; \quad (10)$$

$$h = t_{солн} \cdot 15 + 180^\circ, \quad (11)$$

где n - номер дня года.

Истинное солнечное время восхода и захода Солнца определяется решением следующего выражения:

$$t_{солн}^g = \begin{cases} -3,82 \cdot \left[\arctg\left(\frac{\sqrt{1 - \text{tg}^2\theta \text{tg}^2\delta}}{\text{tg}\theta \cdot \text{tg}\delta}\right) + \pi \right], & \text{при } \delta < 0 \\ 12 - 3,82 \cdot \left[\arctg\left(\frac{\sqrt{1 - \text{tg}^2\theta \text{tg}^2\delta}}{\text{tg}\theta \text{tg}\delta}\right) + \pi \right], & \text{при } \delta > 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$t_{солн}^3 = 24 - t_{солн}^6.$$

Для перевода величины прихода солнечной радиации с горизонтальной поверхности на наклонную в соответствии с изотропной моделью атмосферы величину суточной суммы суммарной солнечной радиации следует вычислять как:

$$Q_{накл}^{сум} = S_{накл}^{сум} + D_{накл}^{сум} + D_{накл}^{``сум}, \quad (13)$$

где $S_{накл}^{сум}$ - суточная сумма прямой солнечной радиации на наклонную поверхность, Дж;

$D_{накл}^{сум}$ - суточная сумма рассеянной солнечной радиации на наклонную поверхность от небосвода

$D_{накл}^{``сум}$ - суточная сумма рассеянной солнечной радиации на наклонную поверхность от земли, Дж.

Первое слагаемое выражения (13) можно вычислить из выражения:

$$S_{накл}^{сум} = \int_{t_{солн}^6}^{t_{солн}^3} \{ S [\text{Sin}A\ell \cdot \text{Cos}\beta + \text{Cos}(A\omega - Az) \cdot \text{Cos}A\ell \cdot \text{Sin}\beta] \} dt, \quad (14)$$

где β - угол наклона воспринимающей поверхности к горизонту;

$A\omega$ - азимутальный угол воспринимающей поверхности;

Az - азимут Солнца.

Второе слагаемое выражения (13) можно вычислить из выражения:

$$D_{накл}^{сум} = \int_{t_{солн}^6}^{t_{солн}^3} \{ 0,07 \cdot \text{Cos}i \cdot S + 0,5(1 + \text{Cos}\beta) [\text{CП} \cdot (0,3154 - 0,3288Kn) \times \text{Sin}A\ell - 0,07(S \cdot \text{Sin}A\ell)] \} dt \quad (15)$$

где i – угол между солнечным лучом и перпендикуляром к воспринимающей поверхности, вычисляемый из следующего выражения:

$$\text{Cos}i = \text{Sin}A\ell \cdot \text{Cos}\beta + \text{Cos}A\ell \cdot \text{Sin}\beta \cdot \text{Cos}(A\omega - Az) \quad (16)$$

Третье слагаемое выражения (13) можно вычислить из выражения:

$$D_{накл}^{``сум} = \int_{t_{солн}^6}^{t_{солн}^3} [0,5 \cdot B(S \cdot \text{Sin}A\ell) + \text{CП} \cdot (0,3154 - 0,3288Kn) \times \text{Sin}A\ell \times (1 - \text{Cos}\beta)] dt \quad (17)$$

где B – альbedo поверхности.

Для определения суточных сумм прямой и рассеянной составляющих солнечной радиации на горизонтальную поверхность наиболее точной является модель Эрба:

$$\frac{D^{сум}}{Q^{сум}} = \begin{cases} 1 - 0,09Q_{отн}, & \text{при } Q_{отн} \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604Q_{отн} + 4,388Q_{отн}^2 - \\ - 16,638Q_{отн}^3 + 12,33Q_{отн}^4, & \text{при } 0,22 < Q_{отн} \leq 0,8 \\ 0,165 & \text{при } Q_{отн} > 0,8 \end{cases} \quad (18)$$

Влияние облачности на величину инсоляции обуславливается ослаблением прямой радиации и в большинстве случаев возрастанием рассеянной составляющей. Уменьшение прямой радиации с возрастанием облачности не компенсируется увеличением рассеянной солнечной радиации. Вследствие этого, суммарная солнечная радиация, также как и прямая уменьшается с увеличением облачности.

Моделирование процесса образования облаков является многофакторной задачей. В соответствии с этим облачность принято представлять как случайную величину с законом распределения, соответствующим реальным статистическим данным актинометрических и метеорологических наблюдений. Например, в работе [2] экспериментальные наблюдения наилучшим образом описываются бета-законом с соответствующими параметрами распределения. Однако, эти результаты получены по усредненным графикам дневного хода солнечной радиации при средних условиях облачности. Для оптимального управления ФВЭС требуется получение почасовых значений величины облачности. Это невозможно осуществить с помощью вероятностных методов, т.к. возможности их использования оп-

ределяются наличием достоверных вероятностных характеристик (включая допустимость их экстраполяции на будущее) для неоднозначных исходных данных, а образование облаков является неуправляемым нестационарным процессом (нечетким явлением) [10].

Учесть все факторы, влияющие на эволюцию мезомасштабных облачных образований, в какой либо одной модели невозможно. Поэтому рассмотрим несколько моделей, построенных в соответствии с рекомендациями работ, которые в совокупности позволяют дать оценку состояний основных облачных образований при подготовке принятия решения [3]. В основе этих моделей лежат связи, существующие между образованием и эволюцией основных форм облаков и различными синоптическими объектами, включающими воздушные массы, атмосферные фронты, барические образования. Эти связи установлены и закреплены в методических рекомендациях по краткосрочным прогнозам погоды [4].

Модель использующая данные измерений.

Модель предназначена для прогнозирования количества конвективной облачности V на момент $t = \tau$ ее максимального развития в дневные часы суток. Исходными данными для прогнозирования служат результаты вертикального зондирования атмосферы в утренние часы ($t = 0$). Модель описывается следующими функциями

$$\langle \text{ХИ, ХВ, Кстр, F1, V, F2} \rangle \quad (19)$$

где $\text{ХИ} \in E_4$, $\text{ХВ} \in E_8$ – измеряемые и вычисляемые параметры;

Кстр – коэффициент стратификации аэрозольной атмосферы;

V_i – состояния облачности $V_1 = (0-3)$ балла, $V_2 = (4-6)$, $V_3 = (7-10)$;

F_2 – преобразование $\text{Кстр} \rightarrow V$; F_1 – преобразование $\text{ХИ} \times \text{ХВ} \rightarrow E_1$.

Измеряемые параметры на поверхности Земли: $T(0)$ – $t_0\text{C}$ на поверхности $z = 0$ в момент $t = 0$; $f(0)$ – относительная влажность; $P(0)$ – дефицит точки росы; h_{HR} – высота нижней границы облачности. Вычисляемые: t_{max} , t_{min} – среднемесячные сроки наступления максимальной и минимальной температуры; N – среднемесячное значение количества облачности; AN – среднемесячная амплитуда приземной температуры воздуха; γ_1 и γ_2 – среднемесячные значения вертикальных градиентов температуры под и в облаках; ННГ , НВГ – среднесезонные высоты нижней и верхней границы облачности.

По данным Гидрометеоцентра [4] оправдываемость прогноза по моделям такого вида (1) составляет около 65% для районов ЕТС.

Модель прогноза эволюции слоистой облачности

Модель облачности идентифицируют два состояния: а) облачность образуется; б) облачность размывается. Известно [5], что слоистообразная облачность в 85% случаев образуется при адвекции тепла и размывается при адвекции холода.

Необходимые для прогнозирования эволюции облачности параметры ΔT – адвективных изменений температуры и D – изменений дефицита точки росы (для пункта наблюдения) рассчитываются по картам АТ850, АТ700, АТ500 на основе стандартных методик [4].

Статистическая модель облачности

Модель впервые была предложена В.Т. Бобронниковым [6] и затем уточнялась в ряде последних работ [7]. Она позволяет рассчитывать вероятность перехода облачности из одного состояния в другое по времени и пространству, и по полученным характеристикам принять решение о возможности хотя бы однократного наблюдения наземного объекта. В основе модели лежат предположения о том, что потоки событий, управляющие переходами количества облачности из состояния в состояние по времени и пространству – пуассоновские.

$$\text{Модель } \langle \tau, r, V, Q, G \rangle \quad (20).$$

где τ – интервал прогноза, r – расстояние между районами расположенными в зоне однородности,

V_i – конечное число состояний облачности ($i = 1, 2, 3$), $G(r)$ и $Q(r)$ – матрицы вероятностей перехода состояний облачности по районам осреднения из зоны однородной облачности в один и тот же момент времени по пространству и (по времени).

Модель опирается на данные ежесуточных спутниковых наблюдений полей облачности за пятилетний период.

Рассмотренные модели прогноза облачности имеют оправдываемость от 65% до 87% случаев. Для достоверности прогноза необходимо дополнить указанные модели данными, получаемыми с метеорологических ИСЗ.

Использование данных моделей облачности для проектирования и управления ФВЭС затруднено в связи с необходимостью получения многочисленных метеорологических параметров и многолетних статистических данных.

Для моделирования нелинейных систем с тесно взаимосвязанными разнородными переменными может быть предложен нечеткий групповой метод обработки данных (ГМОД) [8]. Этот метод не требует априорных знаний о структуре системы, а позволяет моделировать нелинейную систему на основе принципа эвристической самоорганизации по входным и выходным данным. Анализ практических исследований показывает, что этот метод целесообразно применять для моделирования нечетких явлений.

Литература

1. *Матвеев Л.Т.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 639 с.
2. *Зайцев И.В.* Оптимальное управление автономными ФВЭС. Дисс. на соискание уч. ст. канд. тех. наук, Краснодар, 1992.
3. *Сазыкин Б.В.* Методы принятия решений и управление техническими системами в условиях неопределенности. Дисс. на соискание степени доктора технических наук, М.: 1993.
4. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч.1.- Л.: Гидрометеоиздат, 1986. - 696 с.
5. *Дубровина Л.С.* Облака и осадки по данным самолетного зондирования. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982, - 216 с.
6. *Бобронников В.Т.* Математические модели для априорного планирования наблюдений земли из космоса // Исследование земли из космоса. – 1981. – №1. – С. 83-89.
7. *Сазыкин Б.В.* Модель принятия решений в условиях неопределенности для прогнозирования состояний стохастической системы// Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика. – 1991. – №6. – С. 123-129.
8. *К. Асаи, Д. Ватада и др.* Прикладные нечеткие системы, под. ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. - М.: Мир, 1993, 368 с.
9. *Симанков В. С., Бучацкий П. Ю., Шопин А. В.* Методология моделирования физических процессов в энергетических комплексах с нетрадиционными источниками энергии и оптимизация их параметров. // Труды ФОРА. – 1998. – № 3. – С. 18 - 26.
10. *Симанков В. С., Луценко Е. В.* Адаптивное управление сложными системами на основе теории распознавания образов /ТУ КубГТУ. – Краснодар, 1999. – 318 с.

Modelling insolation with control photowindenergy systems

V.S. Symankov, P.Yu. Buchatski. A.V. Shopin

The model of solar radiation on inclined plane for cloudless sky is considered the review of existing models of cloud forecast is given.