

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; В. А. Комар, к. т. н., доц.; С. В. Кравчук

ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ГЕНЕРИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ЗАДАЧЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БАЛАНСОВОЙ НАДЕЖНОСТИ

В статье проанализирована работа солнечных электростанций с учетом возможности обеспечения графика потребления. Для этого использована математическая модель гауссовых смесей, которая позволяет получить основные вероятностные характеристики процессов генерации и электропотребления. Разработан алгоритм оценки коэффициента стабильности, основанной на анализе полученных характеристик. С учетом результатов анализа стабильности генерирования по предложенному методу определена мощность резерва, что позволяет обеспечить балансовую надежность при покрытии графика электропотребления.

Ключевые слова: солнечная электростанция, балансовая надежность, вероятностные характеристики, гауссовы смеси, мощность резерва, стабильность генерации.

Введение

График генерирования электрической энергии возобновляемыми источниками напрямую зависит от природных особенностей региона, в котором они расположены. Эта особенность возобновляемых источников энергии (ВИЭ) приводит к определённым проблемам при решении задачи обеспечения надежного и качественного электроснабжения потребителей. Государственное стимулирование развития ВИЭ и относительное удешевление оборудования для развития последних привело к росту их доли в балансе ОЭС Украины. В таких условиях необходимо решить задачу согласования графиков электропотребителей с графиками генерирования ВИЭ для повышения эффективности функционирования как потребителя, так и электрической сети. Это привело бы к снижению использования органического топлива и, как следствие, к уменьшению негативного воздействия на экологию.

Получить желаемый эффект от согласования графиков потребления и генерации невозможно без применения средств реализации Smart Grid технологий [1]. Однако «умное» ведение режима невозможно без предварительной оценки потенциальных возможностей источников энергии по покрытию потребностей потребителей электроэнергии.

Целью данной работы является разработка метода оценки стабильности покрытия заданного графика потребления потенциально возможным генерированием солнечной электростанции (СЭС) и определения мощности источника резерва по результатам проведенного оценивания.

Оценка стабильности СЭС

Оценку стабильности работы ВИЭ проводили в ряде работ [2, 3, 4]. Так в [2] для определения стабильности покрытия графика потребления источником возобновляемой энергии предложено ввести коэффициент стабильности. Он характеризует вероятность покрытия графика нагрузки источником энергии определенной мощности и графика генерации:

$$k_{\text{стаб}} = \sum_{i=1}^{24} \left[p_{\text{сут } i} \sum_{j \in M} \left(p_{\text{ВИЭ } j} \sum_{l \in N} p_{\text{ном } l} \right) \right], \quad (1)$$

где $p_{\text{сут}}$ – вероятность появления ступени суточного графика $p_{\text{сут}} = \frac{1}{24}$; $p_{\text{ВИЭ}}$ – вероятность

появления ступени генерации ВИЭ в течение данного периода; M – множество ненулевых ступеней генерирования; p_{nom} – вероятность появления ступени потребления в течение данного периода; N – множество ступеней потребления, которые находятся ниже уровня генерации соответствующего времени суток.

К преимуществам этого метода определения коэффициента стабильности можно отнести относительную простоту, однако такой подход определенным образом ограничен при решении задач прогнозирования. В статье предложено усовершенствовать этот метод использованием смеси нормальных законов распределения.

Исходя из того, что СЭС меняют свою мощность генерации в течение суток (рис. 1а) и года (рис. 1б) предлагаем осуществлять оценку стабильности покрытия графика потребления по сезонам.

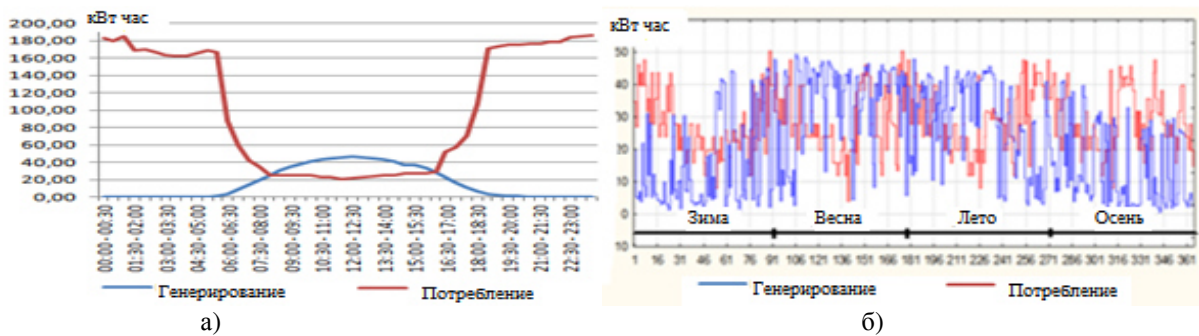


Рис. 1. а) суточный график потребления и генерации СЭС, б) изменение мощностей генерации и потребления в течение года

Как видно из рис. 2, переход к сезонному анализу является обоснованным. Поскольку в период максимального генерирования СЭС зимой (рис. 2а), наиболее вероятная мощность СЭС находится в пределах 10 ... 30% от установленной. В летний период наиболее вероятное значение мощности СЭС находится в диапазоне от 70 – 85%.

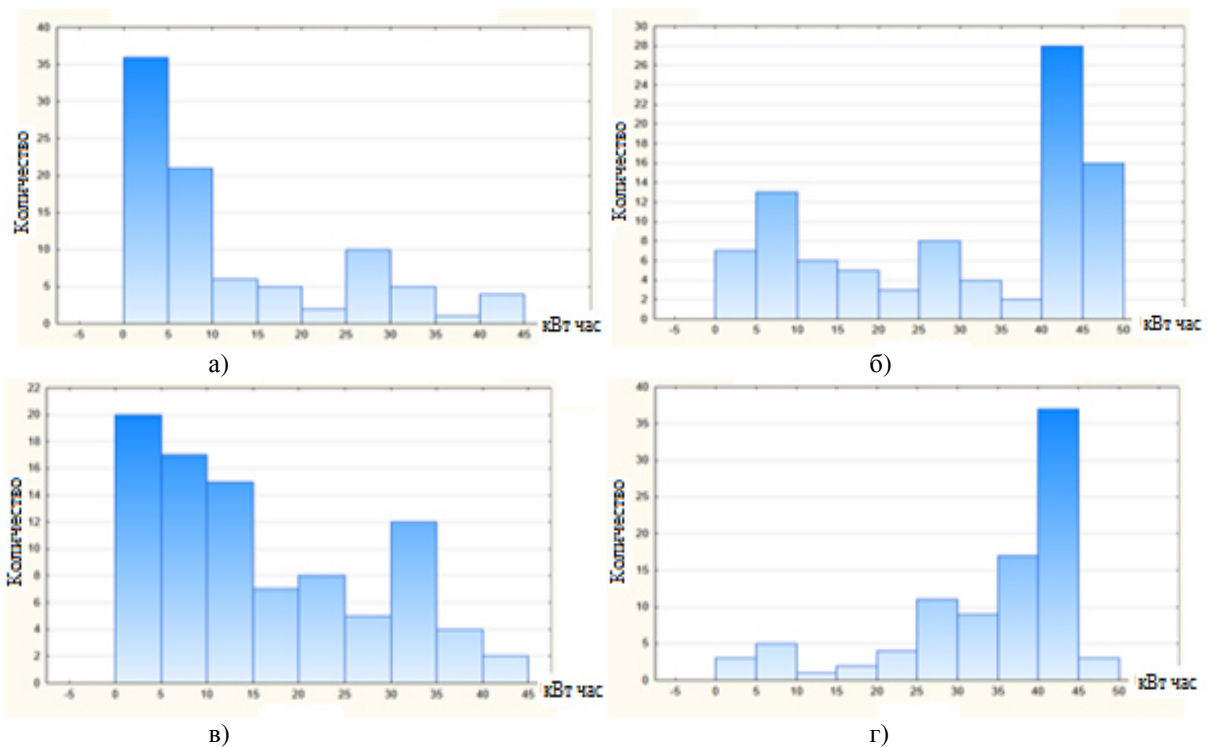


Рис. 2. Гистограмма плотностей генерирования СЭС по сезонам: а) зима, б) весна, в) осень г) лето

Для определения необходимого объема резервирования стабильность будем оценивать не только по сезонам, но и на каждом временном промежутке. Проиллюстрируем оценку стабильности генерирования СЭС на примере летнего периода на временном промежутке от 11:30 до 12:00 (рис. 3).

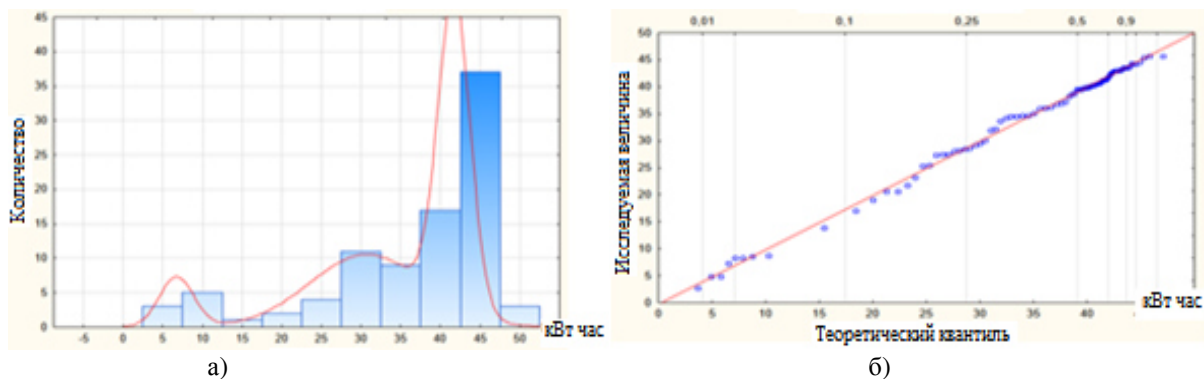


Рис. 3. а) гауссовая смесь описывает закон распределения генерирования СЭС, б) график типа квантиль-квантиль для теоретически предложенного закона распределения

Для предложенного распределения, как описано в [5], посчитан критерий Колмогорова – Смирнова, который показывает соответствие теоретически предложенного распределения эмпирическим данным, поскольку $p = 0,98$, что значительно больше $0,05$. Из рис. 3а видно, что достаточно точное воспроизведение плотности случайной величины можно получить смесью из трех компонент гауссового распределения.

Оценивание вероятностных характеристик предложенной смеси осуществляем по критерию максимума правдоподобия с помощью EM-алгоритма [6].

$$p(x) = \sum_{j=1}^k w_j p_j(x), \quad (2)$$

где $p_j(x)$ – функция плотности распределения j -той компоненты смеси, w_j – вес j -той компоненты смеси (априорная вероятность), $\sum_{j=1}^k w_j = 1$, $w_j \geq 0$, $j = 1 \dots k$ – количество компонент в смеси.

Функция плотности распределения имеет вид:

$$p_j(x) = \frac{1}{(2\pi)^k |\zeta_j|^{1/2}} e^{\left(-\frac{1}{2}(x-\mu_j)^T \zeta_j^{-1}(x-\mu_j)\right)}, \quad (3)$$

где μ_j – математическое ожидание j -той компоненты, ζ_j – ковариационная матрица j -той компоненты, имеющая смысл среднеквадратичного отклонения.

Функции правдоподобия принадлежат параметрическому семейству распределений $\varphi(x; \theta)$ и отличаются только значениями параметров $p_j(x) = \varphi(x; \theta_j)$, $\theta_j = \{\mu_j, \zeta_j\}$, при этом φ – фиксированная функция. Иными словами, выбрать объект x из смеси $p(x)$ означает выбрать его по распределению $p_j(x)$ с вероятностью w_j .

Задачу расщепления смеси решают, когда, имея выборку X^m случайных величин из смеси $p(x)$, зная число k и функцию φ , нужно оценить вектор параметров:

$$\theta_j = (w_j, \theta_j). \quad (4)$$

Оптимальное количество компонент в общей модели смеси гауссового распределения можно получить путем перебора возможных вариантов. При этом решаем задачу несколько раз для постепенного увеличения (уменьшения) значений k , для которого строим график зависимости правдоподобия $\theta_j = \arg \max_{\theta} \sum_{x_i \in X^m} \ln \phi(x_i, \theta_j)$ от k и выбираем наименьшее k , при котором график отражает резкий скачек правдоподобия (рис. 4).

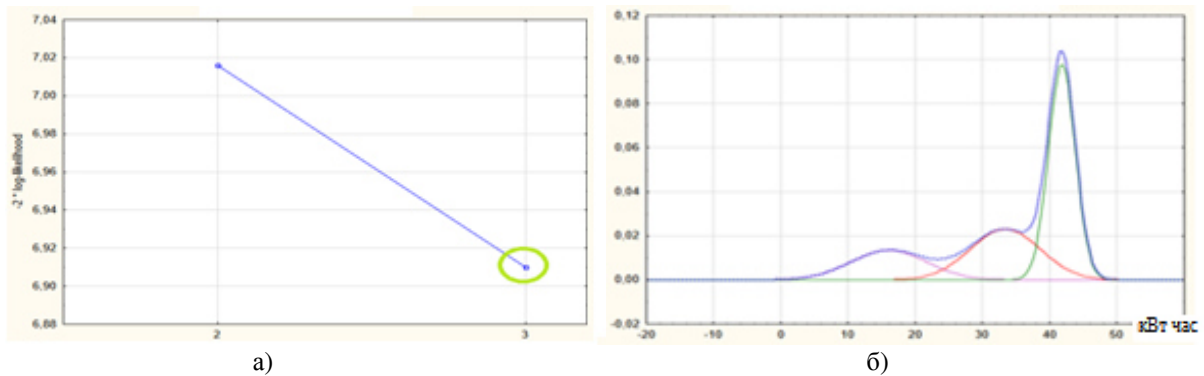


Рис. 4. а) определение оптимального количества компонент смеси распределения мощности генерирования СЭС, б) изображение распределения мощности генерирования СЭС

Результаты определения вероятностных характеристик генерирования СЭС и нагрузки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результат определения вероятностных характеристик мощности генерирования СЭС и потребления

Параметры	Генерирование СЭС			Потребление	
	K1	K2	K3	K1	K2
Математическое ожидание, μ	12,65	31,88	41,79	21,913	37,36
Среднее отклонение, σ	3,09	3,86	1,92	5,378	2,98
Коэффициент вариации, V	0,244	0,12	0,046	0,24	0,08
Вес, w	0,19	0,31	0,5	0,81	0,19
Минимальное значение	2	25,36	38,196	7,2	33
Максимальное значение	23,16	37,18	45,76	32,41	44,32

Для оценки покрытия заданного графика потребления генерированием СЭС предлагаем разбить каждую компоненту генерирования и нагрузки на составляющие, что значительно повысит точность расчета, и найти вероятность их появления с помощью интеграла вероятности:

$$F(X_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{X_u}^{X_{u+1}} e^{-\frac{r^2}{2}} dX_u, \tag{5}$$

где $r = \frac{(X_u - \mu)}{\sigma}$, а X_u соответственно принимает значение X_u и X_{u+1} каждой составляющей компоненты генерирования СЭС или потребления.

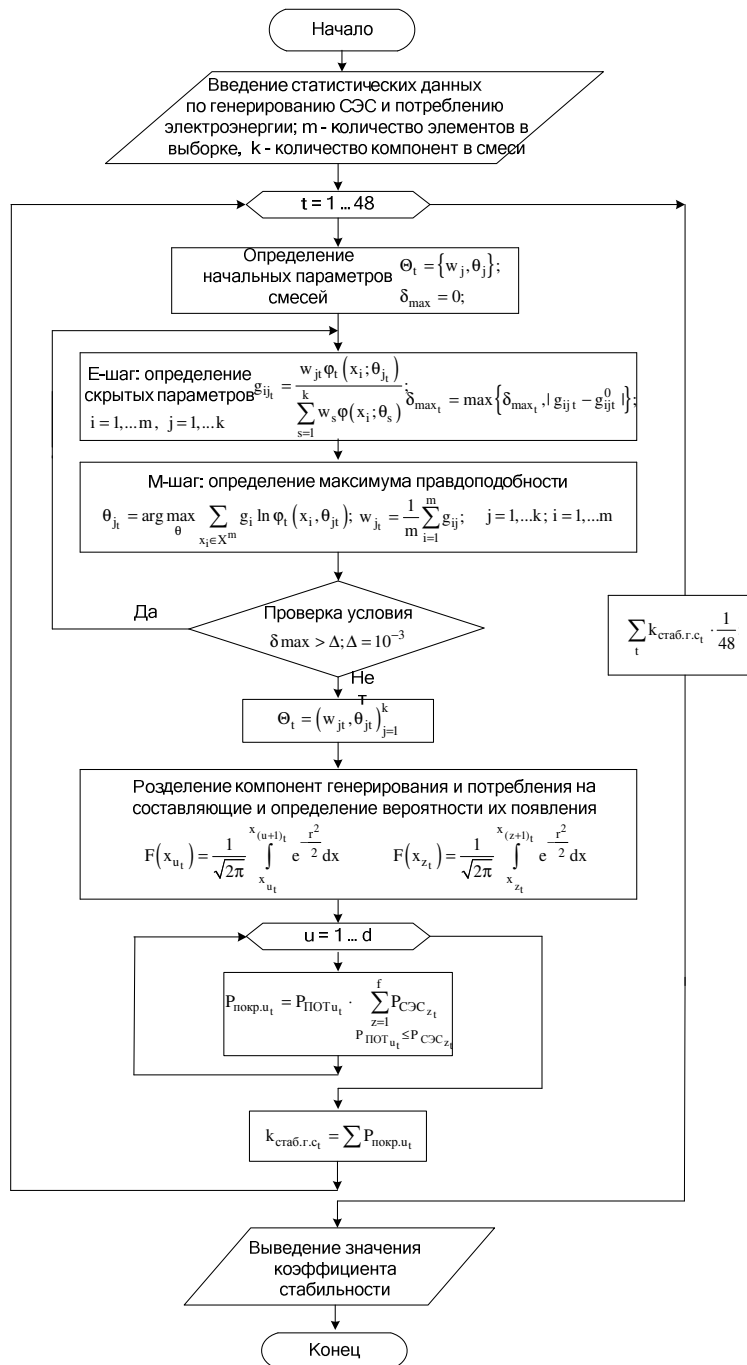


Рис. 5. Алгоритм определения коэффициента стабильности генерирования СЭС

Предложенный алгоритм определения коэффициентов стабильности генерирования СЭС (рис. 5) позволит определить вероятность обеспечения балансовой надежности.

Распределение плотности генерации и нагрузки для примера рассматриваем на промежутке времени 11:30 – 12:00, как показано на рис. 6а. Характер изменения вероятностей показан на рис. 6б.

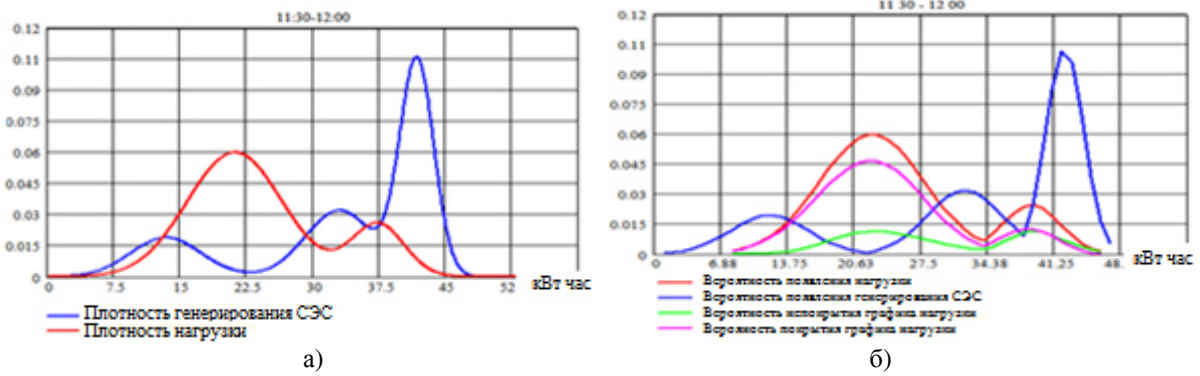


Рис. 6. а) плотность распределения мощности потребления и генерации СЭС; б) графическое представление вероятности покрытия и непокрытия заданного графика потребления генерированием СЭС

На промежутке времени 11:30 – 12:00 летнего периода вероятность покрытия графика потребления составляет $\sum_i P_{покр_i} = 0.72$. Результаты расчета и характер их изменения показаны на рис. 7.

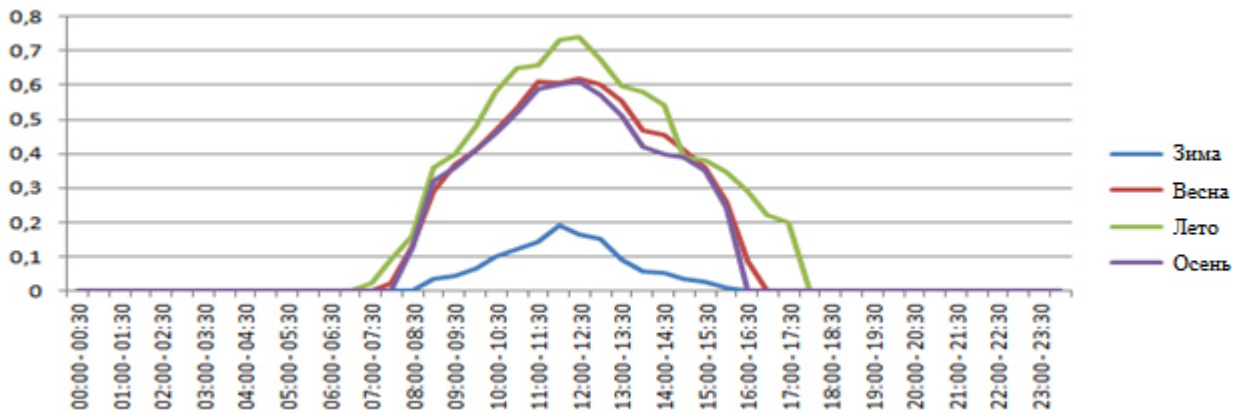


Рис. 7. Изменение вероятности покрытия графика потребления генерированием СЭС в течение суток каждый сезон

Обобщенный показатель стабильности определен по алгоритму, показанному на рис. 5, и определен по (1) для различных сезонов. Полученные данные сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты определения коэффициентов стабильности генерирования СЭС

Коэффициенты	Зима	Весна	Лето	Осень
$k_{стаб.г.с.}$	0,025	0,151	0,191	0,143
$k_{стаб.}$	0,031	0,160	0,201	0,151

Отличие в результатах объясняют допущением об одинаковой вероятности появления каждой из ступеней генерирования и нагрузки, которое принято в [2]. Это допущение упрощает процесс вычисления, но приводит к определенной погрешности в результатах. Наиболее ощутим этот недостаток при определении коэффициента стабильности для зимнего периода.

Определение мощности резерва

Одним из основных путей обеспечения балансовой надежности является резервирование,

поэтому вопрос определения необходимого уровня резерва в условиях внедрения возобновляемых источников электроэнергии, генерирование которых является нестабильным, особенно актуален.

Для обеспечения балансовой надежности потребителя определяем количество электроэнергии, которое и должно обеспечивать источник резерва на t -том промежутке времени суток в любое время года с учетом коэффициента стабильности:

$$W_{рез_t} = (1 - k_{стаб.г.с.}) \cdot W_{ПОТ_{макс_t}}, \quad (6)$$

где $W_{рез_t}$ – количество электроэнергии, которое должно быть отпущено источником резерва на t -том промежутке времени, $k_{стаб.г.с.}$ – коэффициент стабильности генерирования, определенный по методу (рис. 5), $W_{ПОТ_{макс_t}}$ – максимальное количество электроэнергии, которое было потреблено на t -том промежутке времени суток.

По величине электроэнергии, которая должна быть отпущена за полчаса, используя известные формулы [7], можно перейти к величинам мощностей источника резерва.

Генерирование СЭС зависит от изменения продолжительности светового дня, в свою очередь последний зависит от смены сезонов, поэтому в работе анализируем изменение мощности резерва для каждого сезона отдельно и соответственно с разной продолжительностью работы СЭС. Для лета количество рабочих часов СЭС наибольшее, а для зимы – наименьшее.

Изменение величины резервируемой мощности в течение суток для зимы, весны, лета и осени представлены в виде кривых (рис. 8).

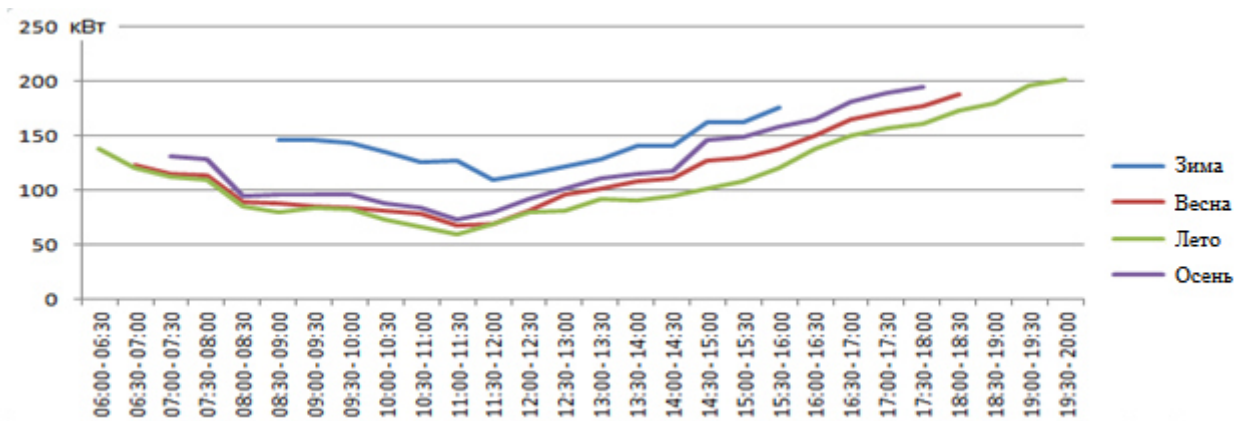


Рис. 8. Зависимость резервированной мощности от времени суток для зимы, весны, лета и осени

По полученным кривым можно определить маневренные характеристики источника резервной мощности и его мощность на каждом промежутке времени.

Выводы

Государственное стимулирование и относительное удешевление на рынке оборудования для возобновляемых источников энергии способствуют их интенсивному развитию. Однако зависимость их работы от природных условий не позволяет гарантировать потребителям надежное снабжение электроэнергией без резерва, который обеспечивают источники традиционной энергетики.

В статье проведен анализ статистических данных генерирования солнечных электрических станций. Для анализа вероятности покрытия графика нагрузки был усовершенствован метод определения коэффициента стабильности путем использования модели гауссовых смесей. Это позволило повысить точность полученных результатов.

Разработанный в работе алгоритм определения коэффициента стабильности позволяет

определить характер изменения резервированной мощности в течение суток и в дальнейшем оценить маневренные характеристики источника резерва и его мощность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Agarwal Y. Understanding the role of buildings in a smart microgrid / Y. Agarwal, T. Weng, R. Gupta // 2011 Design, Automation & Test in Europe. – 2011. – P. 1 – 6.
2. Lezhniuk P. D. Method for determination of optimal installed capacity of renewable sources of energy by the criterion of minimum losses of active power in distribution system / P. D. Lezhniuk, V. A. Komar, D. S. Sobchuk // Energy and Power Engineering. – 2014. – Vol. 6. – No. 3. – P. 37 – 46.
3. Кузнецов Н. П. Прогнозирование производства электроэнергии ветровыми электростанциями / Н. П. Кузнецов // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 8. – С. 54 – 58.
4. Попов В. А. Алгоритм многокритериального управления режимами работы микросетей / В. А. Попов, Е. С. Ярмолук, П. А. Замковой // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 2. – P. 61 – 68.
5. Айвазян С. А. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
6. Jeroen, K. An EM algorithm for the estimation of parametric and nonparametric hierarchical nonlinear models / K. Jeroen // Statistica Neerlandica. – 2004. – Vol. 58. – No. 2. – P. 220 – 233.
7. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В. М. Божко. – К. : Техніка, 1981. – 160 с.

Лежнюк Петр Демьянович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электрических станций и систем, e-mail: lpd@inbox.ru.

Комар Вячеслав Александрович – к. т. н., доцент, доцент кафедры электрических станций и систем, e-mail: kvo76@mail.ru.

Кравчук Сергей Васильевич – аспирант кафедры электрических станций и систем, e-mail: w1_1992@mail.ru.

Винницкий национальный технический университет.