

Выводы. На основе результатов выполненных ранее исследований разработана и изготовлена действующая пиролизная установка ОП-800 с вертикальными шахтами и выемными металлическими ретортами, осуществляющая полный цикл производства древесного угля от сушки сырья до охлаждения продукции. При этом тепловой режим в установке поддерживается благодаря сгоранию образующихся в процессе пиролиза газов и жидких продуктов. Производительность установки – 200 тонн древесного угля марки А.

Список использованных источников

1. Felicano-Bruzual C. Charcoal injection in blast furnaces (Bio-PCI): CO₂ reduction potential and economic prospects//J. Mater. Res. Technol, 2014. – Vol.3, No 3. – Pp. 233-243.
2. Alburquerque J.A., Calero J.M., Barron V. et al. Effects of biochars produced from different feedstoks on soil properties and sunflower growth. J. Plant Nutr. Soil.Sci // 2014. – V. 177. – Pp. 16-25.

УДК 621.311.6:621.311.001.57

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАТОР–НАКОПИТЕЛЬ–ПОТРЕБИТЕЛЬ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВИЭ

*К.В. Добрего, Г.Б. Ковтун, А.Д. Дубатовка
Белорусский национальный технический университет*

Одним из трендов развития энергетики во всем мире является увеличение доли генерации за счет возобновляемых источников энергии. Снижение рыночной стоимости фотоэлектрических панелей, происходящее в последние десятилетия [1] приводит к тому, что солнечная электрогенерация становится экономически привлекательной, в том числе в странах с умеренным потенциалом солнечной энергии. При этом стоимость накопителей энергии не имеет тенденции к снижению. Поскольку ВИЭ развиваются в рамках систем «генератор – накопитель – потребитель» (ГНП), вопрос экономической эффективности использования ВИЭ должен решаться путем оптимизации системы в целом.

Ввиду того, что прямые испытания и оптимизация систем ГНП требуют больших затрат, приобретает актуальность адекватное компьютерное моделирование таких систем. Для моделирования системы «генератор-накопитель- потребитель» требуются модели работы всех элементов этой системы, причем согласованные по детальности и методическим подходам. В коммерческих программах для расчета параметров автономных гибридных энергетических систем таких как HOMER, Hybrid2, HOGA [2], используются достаточно грубые статистические модели, что уменьшает их ценность как исследовательского инструмента и отсутствует доступ к кодам.

В работе [3] представлена имитационная модель потребления электроэнергии жилищно- бытового объекта, реализующая статистически правдоподобные графики нагрузки, учитывающие индивидуальные включения- выключения всех электропотребителей.

Моделирование метеозависимых источников энергии (солнечной и ветрогенерации) требует имитации соответствующих метеопараметров [4, 5]. Так для моделирования солнечной генерации используется модель внеатмосферной облученности («простая модель солнечного неба» [6]) и модель пропуска атмосферы, соответственно для ветрогенерации – модель графика силы ветра.

В настоящей работе представлена методика моделирования метеозависимых источников энергии на основе пошагового численного решения статистического уравнения Ланжевена, используемого для расчета броуновского движения частиц. Предложена методика определения параметров уравнения Ланжевена обеспечивающих выполнение статистических закономерностей соответствующих метеорологических процессов на трех временных масштабах, – автокорреляцию временного ряда значений параметров, вариабельность дневных и недельных распределений значений соответствующих параметров.

Так для облученности горизонтальной площадки можно записать

$$I(t) = 1.362 \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi d_n}{365} \right) \right) \cos \theta_z \cdot \sin \left(\frac{\pi(t - t_{rise})}{t_{set} - t_{rise}} \right) \times M(t),$$

где d_n , θ_z , t_{rise} , t_{set} , $M(t)$ – функция пропускания атмосферы от времени, $M(t) \in [0,1]$.

Модель пропускания атмосферы предполагает квазислучайное изменение пропускания атмосферы, подчиняющееся определенным статистическим закономерностям, делающим это изменение правдоподобным [7].

В качестве статистического уравнения примем уравнение Ланжевена

$$m \ddot{M} + \nu \dot{M} = F(M) + \tilde{f}(t), \quad (1)$$

где ν – эффективная «вязкость» для изменения M , m – коэффициент инерционности изменения M , $F(M)$ – силовое поле определяемое профилем потенциальной ямы, эквивалентной актуальному распределению вероятности того или иного значения пропускания (как правило, задаваемым Вейбулловским распределением) $F_{WEI}(M)$, $F(M) = const \cdot \partial F_{WEI}(M) / \partial M$, $\tilde{f}(t)$ – стохастическая функция. Величина пропускания M не является физической координатой броуновской частицы, однако для наглядности можно исходить из механической интерпретации уравнения (11) и использовать понятия «инертность», «вязкость», «импульс» и «координата». Инерционный член

в (11) обеспечивает немарковский характер последовательности значений пропускания атмосферы, а вязкость препятствует быстрому изменению M .

Рассматриваем уравнение (12) в дискретном виде, и ищем его решение на пространственно-временной сетке $M = M(t_0 + i \cdot \Delta\tau)$. При этом функция $\tilde{f}(t)$ не является непрерывной стохастической функцией с нулевым временем автокорреляции, а кусочно-постоянной случайной функцией времени.

Таким образом, модель определяется параметрами m , ν , амплитудой $\tilde{f}(t)$, характером силового поля $F(M)$ и шагом по времени $\Delta\tau$. Естественным масштабом для «координаты» в этой задаче будет величина разрешения первичных данных о распределении атмосферного пропускания ΔM , например, 0,1.

Исходными данными для имитационного моделирования являются: 1) статистическое распределение пропускания атмосферы для заданного месяца или среднегодовое (матожидание, дисперсия, профиль распределения Вейбулла или иной), входящее в (1); 2) время автокорреляции графика пропускания атмосферы по уровню 0.4, τ_A характеризующее изменчивость пропускания на временах порядка часов; 3) значения вариабельности распределения пропускания (от недели к неделе и месяца к месяцу), характеризующие более долгосрочные особенности пропускания Var_{short} , Var_{long} .

Под вариабельностью двух последовательных рядов, установленных за два последовательных периода времени F_1 и F_2 понимаем относительную величину среднеквадратичных отклонений этих распределений друг от друга

$$Var(F_1, F_2) = \frac{1}{\max(F_1)} \sqrt{\frac{1}{N_{\max}} \sum_i^{N_{\max}} (F_1(i\Delta x) - F_2(i\Delta x))^2}, \quad (2)$$

где Δx шаг по времени.

Поскольку уравнение (1) позволяет определить три независимых безразмерных комплекса, характеризующих процесс, то целесообразно определить их таким образом, чтобы каждый из них был связан со значением одного исходного параметра задачи.

Существенной особенностью предлагаемой модели является то, что амплитуда случайной силы воздействия определяется глубиной потенциальной ямы $|\tilde{f}| \sim \sqrt{D(x)}$.

Поиск параметров (1) наилучшим образом соответствующих необходимым требованиям по τ_A , Var_{short} , Var_{long} относится к плохо определенным статистическим задачам. Решение ее предлагается решить в рамках алгоритма пристрелки. Для этого проводится значительное (порядка 10^3) количество индивидуальных расчетов величины пропускания атмосферы. Каждый расчет позволяет определить статистические параметры полученного временно-

го ряда и сопоставить их входным параметрам уравнения (1), представляет собой отображение $(KK1, KK2, KK3) \rightarrow (\tau_A, Var_{short}, Var_{long})$, которое можно изобразить в виде статистического облака и найти корреляции $\tau_A = Cor(KK1, KK2, KK3)$, $Var_{short} = Cor(KK1, KK2, KK3)$, $Var_{long} = Cor(KK1, KK2, KK3)$. Соответственно можно определить и обратные корреляции $KK1 = Cor(\tau_A, Var_{short}, Var_{long})$, $KK2 = Cor(\tau_A, Var_{short}, Var_{long})$ и $KK3 = Cor(\tau_A, Var_{short}, Var_{long})$.

В качестве примера исходных данных приведем распределение мощности генерации за день (6 июля 2016 года). Временной промежуток выборки – двенадцать часов (с 6:00 до 18:00), шаг – 10 минут (рис. 1), недельная вариабельность дневных распределений вырабатываемой солнечными батареями электроэнергии (1-7 июля 2016 года). По оси абсцисс указан порядковый номер сравниваемых дневных данных (1 соответствует сравнению первого и второго июля и т.д.).



Рисунок 1 – Дневное распределение вырабатываемой электроэнергии. Летний сезон, 6 июля 2016

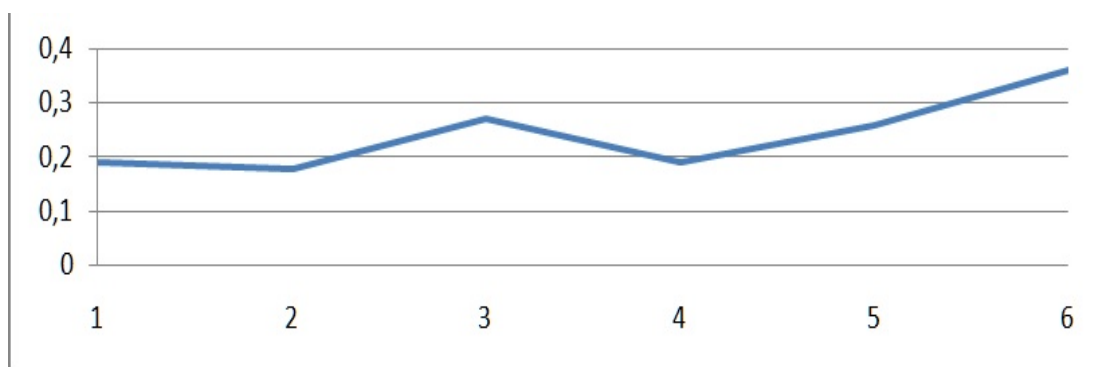


Рисунок 2 – Недельная вариабельность дневных распределений вырабатываемой солнечными батареями электроэнергии (1-7 июля 2016 года)

С помощью аналогичной стохастической модели задается изменение скорости ветра для моделирования ветрогенерации. Пример исходных данных для моделирования приведен на рис. 3 и 4.

Выводы. Использование стохастических моделей позволяет генерировать правдоподобные графики солнечной и ветрогенерации практически с высоким временным разрешением и, таким образом, проводить имитационное моделирование и оптимизацию автономных энергетических систем «генератор – накопитель – потребитель».

Построенные модели могут найти применение при оптимизации систем АСКУЭ, при решении экологических, сельскохозяйственных и других задач.

Список использованных источников

1. Bloomberg new energy Finance [<https://about.bnef.com/>]. Моделирование систем генератор – локальная энергетическая система.
2. Kondili E. Design and performance optimization of stand-alone and hybrid wind energy systems in Stand alone and hybrid wind energy systems. Ed.by J.K. Kaldellis, Woodhead Publ. Ltd., 2010.
3. Доброго К.В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло. Наука и техника. – 2017. – Т.16, №2. – С. 160-170.
4. Taehong Sung, Sang Youl Yoon and Kyung Chun Kim. A Mathematical Model of Hourly Solar Radiation in Varying Weather Conditions for a Dynamic Simulation of the Solar Organic Rankine Cycle. Energies. – 2015. – V.8. – Pp. 7058-7069.
5. Philipoppoulos K., Deligiorgi D. Statistical simulation of wind speed in Athens, Greece based on Weibull and ARMA models. Int. J. of Energy and Environment. – 2009. – Issue4. – V.3. – Pp. 151-158.
6. Iqbal M. An Introduction to Solar Radiation; Elsevier. – New York, USA, 1983.
7. Yuanshi Zhang, Aina Tian, Yanlin Pan. Research on Wind Power Simulation Model. Industrial Engineering, Machine Design and Automation (IEMDA 2014) & Computer Science and Application (CCSA 2014). Proceedings of the Congress. World Scientific Publ., 2015. – Pp. 14-130.

УДК 620.9

СИСТЕМА ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ НА БАЗЕ ГИБРИДНОЙ УСТАНОВКИ

*М.А. Комаревцев, А.Н. Попов, Д.А. Ярков
Северный (Арктический) Федеральный Университет*

Гибридная энергоустановка представляет собой систему, работающую на основе традиционных и альтернативных источников энергии. Эта система позволяет решить такую проблему, как энергообеспечение удаленных населенных пунктов.