

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ СЭС В УСЛОВИЯХ РЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

2 ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
НАГРУЗОК В СЭС

V. POPOV, F. ZHURAVLOV, V. SIDORENKO, V. STEPANOVA

INCREASING EFFICIENCY OF MODELING ELECTRICAL LOADS IN DISTRIBUTION SYSTEMS

Аннотация. У статті описано підхід, що дозволяє використовувати дані про електроспоживання для визначення характерних значень (максимального, мінімального, середнього) навантажень або графіків навантажень окремих споживачів або їх груп. Важливим чинником ефективного застосування розробленого алгоритму є наявність об'єктивної інформації відносно типових графіків навантаження споживачів, які диференційовані не лише за технологічною ознакою, але і по сезонах року і характерних днях тижня.

Запропонований алгоритм дозволяє враховувати фактичну невизначеність використовуваної обмеженої статистичної інформації для побудови типових графіків в інтервальной формі не лише для споживачів електричної енергії, але і для альтернативних генеруючих джерел, інтегрованих в розподільні мережі.

У роботі також розглянутий ряд алгоритмів, спрямованих на підвищення адекватності моделювання навантажень в системах електропостачання з джерелами розподіленої генерації.

Ключові слова: режими СЕП, характеристика електроспоживання, графіки навантаження споживачів.

Аннотация. В статье описан подход, позволяющий использовать данные об электропотреблении для определения характерных значений (максимального, минимального, среднего) нагрузок или графиков нагрузок отдельных потребителей или их групп. Важным фактором эффективного применения разработанного алгоритма является наличие объективной информации о типовых графиках нагрузки потребителей, дифференцированных не только по технологическому признаку, но и по сезонам года и характерным дням недели.

Предложенный алгоритм позволяет учитывать фактическую неопределенность используемой ограниченной статистической информации для построения типовых графиков в интервальной форме как для потребителей электрической энергии, так и для альтернативных генерирующих источников, интегрируемых в распределительные сети.

В работе также рассмотрен ряд алгоритмов, направленных на повышение адекватности моделирования нагрузок в системах электроснабжения с источниками распределенной генерации.

Ключевые слова: режимы СЭС, характеристики электропотребления, графики нагрузки потребителей.

Annotation. Approach, allowing the use of data regarding an electric energy consumption for determination of typical values (peak, minimum, average) of electrical loads or their curves for separate consumers or group of consumers, is described in this article. The important factor of effective application of the developed algorithm is a presence of objective, reliable information about the typical load-curves of consumers, that is differentiated not only on technological principle, but also in according with the seasons of year and characteristic days of week.

The offered algorithm allows one to take into account the actual uncertainty of the used limited statistical data in the process of the construction of typical load curves in an interval form, not only for consumers but for alternative generating sources, integrated in distribution networks as well.

The set of algorithms, directed to the increase of adequacy of load modeling in the power supply systems with the sources of the distributed generation, is also considered in-the paper.

Key words: distributed generation, typical load-curves of consumers, electrical loads.

Введение

В первой статье данного цикла [1] была обоснована важность адекватного (по номенклатуре, объему и качеству) информационного обеспечения для успешного решения задач построения систем электроснабжения (СЭС) нового поколения и управления их режимами. При этом особое внимание обращалось на вопрос оценки электрических нагрузок, учитывая крайне ограниченное оснащение существующих СЭС современными цифровыми измерительными системами и каналами передачи данных. Учитывая реальные возможности (материальные, технические) отечественных энергокомпаний, в ближайшей перспективе повышение качества информации относительно электрических нагрузок может быть достигнуто несколькими путями.

Во-первых, это связывается с расширением сети телеизмерений. Здесь могут рассматриваться различные многофункциональные цифровые измерительные системы. Применение данных устройств в некотором минимальном объеме будет необходимо, принимая во внимание тенденцию к постепенному увеличению количества размещаемых в СЭС источников распределенной генерации. В этом случае измерение параметров режима требуется для нормального функционирования микропроцессорных устройств управления средствами релейной защиты, используемой в создаваемых интегрированных системах. Подобные устройства могут работать как полностью автономно, так и с предусмотренной возможностью сбора и последующей передачи результатов измерений, в частности, нагрузок в диспетчерский центр. Однако в указанных случаях чаще всего речь идет не об оценке индивидуальных нагрузок, а о замерах параметров режима групп потребителей, питающихся от одного или нескольких узлов распределительной сети.

Во-вторых, для целей оценки электрических нагрузок целесообразно использовать ретроспективные данные, а также некоторые косвенные показатели (например, типовые графики нагрузок, сведения об электропотреблении при наличии соответствующих алгоритмов их пересчета в почасовые значения электрических нагрузок). Указанный путь можно считать наиболее перспективным в настоящее время. Активное и масштабное внедрение систем учета является неотъемлемым условием нормального функционирования электроэнергетики в рыночных условиях. Поэтому использование АСКУЭ как многофункциональных измерительных систем (что не потребует существенных дополнительных материальных затрат) позволяет существенно увеличить объем данных относительно электрических нагрузок, в том числе, определяемых в перспективе и в реальном времени.

В-третьих, важным фактором повышения качества информационного обеспечения является корректный учет фактического уровня неопределенности используемых исходных данных как относительно нагрузок отдельных узлов сети, так и мощности, генерируемой источниками (в первую очередь альтернативными) распределенной генерации, интегрируемыми в распределительную сеть.

В [1] представлен перечень исходных данных, используемых в блоке формирования электрических нагрузок информационно-вычислительного комплекса ИВК-СЭС для целей моделирования режимов. Многие из указанных данных традиционно использовались при определении нагрузок и применяемые при этом алгоритмы хорошо известны.

В частности, при наличии периодических замеров нагрузки моделирование любого произвольного режима работы потребителя осуществляется, используя соответствующий типовый график нагрузки:

$$P_t = \frac{P_\tau P_t^*}{P_\tau^*},$$

где P_τ - результат замера;

P_t^* , P_τ^* - соответствующие ординаты типового графика нагрузки.

1 Использование данных об электропотреблении при моделировании режимов распределительных сетей

Относительно новым видом информации, который целесообразно задействовать для моделирования нагрузок, являются данные об электропотреблении. В этом случае для указанной цели может быть применен следующий алгоритм.

В соответствии с наиболее распространенным подходом типовые графики нагрузки формируются для определенного сезона года, характерных (с точки зрения электропотребления) дней недели (рабочий день, суббота, выходной день) в соответствии со следующими правилами:

$$P_{kt}^* = \frac{P_{kt}}{\max_t \{S_{kt}\}}, \quad Q_{kt}^* = \frac{Q_{kt}}{\max_t \{S_{kt}\}}, \quad t = 1, \dots, T, \quad k \in p, c, в. \quad (1)$$

Помимо этого, для осуществления планируемых расчетов требуется дополнительная информация, например, в виде коэффициентов ($K_c, K_в$), отражающих для всех типовых потребителей усредненное отношение электропотребления соответственно субботнего и выходного дней к электропотреблению рабочего дня.

Допустим, что измеренная величина электропотребления за расчетный период ($n_m = n_p + n_c + n_в$) дней составляет величину W_m .

На основе типовых графиков нагрузки определяем характеристику, эквивалентную объему потребленной за указанный период энергии:

$$W_m^* = P_{pcp}^* T n_p + K_c P_{pcp}^* T n_c + K_в P_{pcp}^* T n_в, \quad (2)$$

где P_{pcp}^* - среднее значение нагрузки рабочего дня, вычисленное по его типовому графику.

Легко показать, что, принимая во внимание (1) и (2),

$$W_m^* S_{p \max} = W_m.$$

Тогда

$$S_{p \max} = \frac{W_m}{W_m^*}.$$

Соответственно вычисляем

$$P_{pt} = P_{pt}^* S_{p \max}, \quad Q_{pt} = Q_{pt}^* S_{p \max}, \quad t = 1, \dots, T.$$

Для субботнего дня имеем:

$$P_{csp} = K_c P_{pcp}, \quad S_{c \max} = \frac{P_{csp}}{P_{csp}^*}.$$

Соответственно вычисляем

$$P_{ct} = P_{ct}^* S_{c \max}, \quad Q_{ct} = Q_{ct}^* S_{c \max}, \quad t = 1, \dots, T.$$

Аналогично для выходного дня получим:

$$P_{всп} = K_в P_{pcp}, \quad S_{в \max} = \frac{P_{всп}}{P_{всп}^*}.$$

Соответственно вычисляем

$$P_{вт} = P_{вт}^* S_{в \max}, \quad Q_{вт} = Q_{вт}^* S_{в \max}, \quad t = 1, \dots, T.$$

В результате выполнения приведенного алгоритма формируются усредненные графики активной и реактивной нагрузок рабочего, субботнего и выходного дней для любого потребителя на основании интегральных данных относительно его электропотребления.

В информационно-вычислительном комплексе ИВК-СЭС предусмотрен еще один алгоритм пересчета данных по электропотреблению в графики активной и реактивной нагрузок. Однако он требует применения отличного от традиционного принципа построения типовых графиков нагрузки. В этом случае ординаты типовых графиков (отражающих суточное изменение как активной, так и реактивной нагрузки) нормализуются относительно максимального часового значения активной или реактивной нагрузки, вне зависимости от того, какая нагрузка и в какой день недели она имела место.

Таким образом, становится очевидным, что типовые графики могут быть важным дополнительным источником информации в процессе определения оценок электрических нагрузок. Соответственно, качество подготовки данного вида информации будет серьезно влиять на адекватность формируемых оценок нагрузок потребителей.

2 Формирование типовых графиков нагрузки

В общем случае типовые графики нагрузки определяются для наиболее характерных потребителей (жилой сектор, учебные заведения, зрелищные учреждения и т.д.) или групп однотипных потребителей (коммунально-бытовая нагрузка, сельскохозяйственные потребители, нагрузка предприятий определенной отрасли промышленности и т.д.). Количество типовых графиков, используемых на практике, варьируется в энергокомпаниях различных стран в достаточно широких пределах. В последнее время многие энергокомпании стремятся создать достаточно обширные по номенклатуре базы типовых графиков активной и реактивной нагрузок, дифференцированные не только по сезонам года, но и по дням недели: рабочий день, суббота, выходной день. Более того, указанные базы должны быть открытыми и могут постоянно корректироваться и дополняться.

Учитывая, что типовые графики нагрузки описывают хотя и однотипные, но различные по своим характеристикам (например, по установленной мощности) потребители, они строятся в относительных единицах.

Традиционно типовые графики нагрузки формировались на основе статистического анализа соответствующих экспериментальных данных. Вместе с тем, существующая практика использования детерминированных типовых графиков (в предположении, что каждая ордината представлена математическим ожиданием), зачастую сформированных на основе весьма ограниченных статистических данных, представляется малоубедительной. Имеющиеся исследования показывают, что, даже приняв априори гипотезу о нормальном законе распределения, для получения убедительных статистических оценок ординат графиков нагрузки требуются выборки объемом 50... 60 измерений. А при этом еще необходимо учесть, что типовые графики должны быть дифференцированы в соответствии с сезонами года и отражать специфику электропотребления соответствующих потребителей в рабочий, субботний и выходной дни. Кроме того, в ряде исследований указывается на относительно ограниченную региональную применимость типовых графиков (учитывая конкретные социальные, экономические, климатические и т.п. условия). Таким образом, в пределах одного энергетического объединения (энергосистемы) иногда возникает необходимость сформировать для каждого характерного потребителя не один, а семейство типовых графиков нагрузки. Очевидно, что при этих условиях далеко не всегда процесс создания базы типовых графиков может базироваться на адекватном (по объему и качеству) статистическом материале.

В связи с этим, в ряде работ, например [2], обосновывается, что, учитывая малый объем, наиболее представительную характеристику выборки желательно определять следующим образом:

$$m_v = P_{io}^* = \frac{1}{5}(2P_{ts}^* + 2Me + Mo). \quad (3)$$

Применительно к задаче формирования типовых графиков нагрузки в выражении (3) P_{ts}^* соответствует среднему нормированному значению ординаты, Me - медианная оценка, представляющая собой 50 % квантиль распределения нормированных значений ординаты, Mo - модальная оценка распределения нормированных значений ординаты.

Вычисленная в соответствии с (3) оценка ординаты графика позволяет исключить или, по крайней мере, уменьшить влияние случайных выбросов и возможных ошибок измерений в выборках малого объема по сравнению с традиционным использованием их средних значений.

Вместе с тем, более адекватные результаты при моделировании нагрузок и режимов распределительных сетей могут быть получены в процессе непосредственного учета реального уровня неопределенности исходной информации, в том числе при построении типовых графиков.

3 Особенности построения интервальных графиков нагрузки

Ниже рассмотрен один из возможных подходов к построению типовых графиков нагрузки, который представляется более естественным и адекватным при ориентации на статистические выборки (экспериментальные данные) малого объема. Основная идея данной процедуры заключается в формировании интервальных оценок ординат графиков, что отражает реальный

уровень неопределенности исходной информации. В этом случае предполагается, что границы каждого интервала соответствуют нормированным максимальному и минимальному значениям ординаты (или какого-либо другого параметра), находящимся в анализируемой выборке. При этом необходимо отметить, что даже при наличии возможности получения достаточного объема статистических данных, учитывая суточную и сезонную нестационарность реальных графиков нагрузки, представляется более обоснованным при формировании типовых графиков ориентироваться не на точечные, а на интервальные оценки ординат, формируя их за счет учета доверительных интервалов соответствующих статистических характеристик.

Однако при формировании интервальных оценок параметров типовых графиков нагрузки требуется проведение определенного дополнительного анализа. Это связано с тем, что наличие случайных выбросов или даже единичных ошибочных измерений в выборках малого объема не только искажает формируемые оценки, но и является причиной необоснованного увеличения уровня их неопределенности. Принимая во внимание малый объем выборки и, соответственно, невозможность корректного применения соответствующих вероятностно-статистических методов, указанный анализ может быть осуществлен на основе специальных эвристических процедур. Ниже представлены алгоритмы, которые могут быть использованы для анализа статистических выборок малого объема любой природы с целью формирования соответствующих интервальных характеристик.

Допустим, экспериментальным путем получено M реализаций суточного графика нагрузки (относящихся к определенному сезону года и дню недели) некоторой группы однотипных потребителей. Интервальную оценку каждой ординаты графика P_t^* , $t = 1, \dots, T$ (в относительных единицах) можно задать следующим образом:

$$\left[\underline{P}_t^*, \overline{P}_t^* \right] | \underline{P}_t^* = \min_i P_{ti}^*, \quad \overline{P}_t^* = \max_i P_{ti}^*, \quad I = 1, \dots, M.$$

В первом алгоритме для отсеивания случайных выбросов используются квартильные характеристики [3], методы вычисления которых, а также выполняемые над ними операции не требуют предположений о характере закона распределения: Me – медиана, q_1 , q_3 – первый и третий квартили, $q_{21} = Me - q_1$, $q_{32} = q_3 - Me$ – левое и правое квартильные расстояния. Вычислим показатель относительного отклонения i -го значения t -ой ординаты:

$$v_{ti} = \frac{Me - P_{ti}^*}{q_{21}}, \text{ если } P_{ti}^* < Me,$$

$$v_{ti} = \frac{P_{ti}^* - Me}{q_{32}}, \text{ если } P_{ti}^* > Me,$$

$$i = 1, \dots, M, \quad t = 1, \dots, T.$$

В этом случае значение ординаты P_{ti}^* можно рассматривать как случайный выброс, если $v_{ti} > \alpha$. Формальных требований относительно выбора величины параметра α не существует. Опыт использования данной процедуры [4], а также существующие рекомендации, например [2], показывают, что формируемые интервальные оценки (в данном случае ординат типовых графиков нагрузки) являются представительными, если принять $\alpha = 1,8 \dots 2,0$.

Второй алгоритм, связанный с отсеиванием случайных выбросов в выборках малого объема, основан на выделении интерквартильных оценок [2]. В этом случае диапазон изменения соответствующей ординаты суточного интервального типового графика нагрузки определяется как ширина интерквартиля.

Аналогичная идея может быть применена и при моделировании графиков генерации для отдельных альтернативных источников энергии. В этих случаях также часто приходится ориентироваться на ограниченные по объему исходные данные. Например, краткосрочные измерения суточного изменения скорости ветра в предполагаемой точке размещения ветрогенератора позволили получить данные, представленные в табл. 1. Эти результаты дают возможность построить типовый (для данного района и сезона года) график суточного изменения скорости ветра (на определенной высоте над уровнем земли) в интервальной форме (рис. 1). Здесь представлены предельные граничные значения ординат графика (светлый фон), а также интерквартильные оценки (темный фон), сформированные на основании анализа данных табл. 1.

Таблиця 1

Результаты измерений значений скорости ветра (м/с) по часам суток (наблюдения за 8 суток)

n/t	01.00	02.00	03.00	04.00	05.00	06.00	07.00	08.00	09.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	00.00
1	3	5	4	4	4	5	5	5	7	7	8	9	9	9	8	8	9	8	8	8	8	7	6	6
2	6	5	5	5	5	5	5	6	5	6	4	2	5	5	5	5	5	6	6	4	3	3	3	3
3	2	2	0	2	1	1	2	3	2	3	4	6	6	7	7	6	5	4	3	3	1	1	2	2
4	2	2	2	3	1	3	3	2	6	3	0	1	0	1	2	3	1	1	2	2	5	5	5	5
5	4	5	5	4	5	4	4	5	5	7	6	5	5	5	2	3	3	3	4	1	2	3	4	4
6	3	2	2	2	3	4	2	3	4	7	8	7	5	4	6	5	4	5	2	1	0	1	2	2
7	4	2	2	3	3	3	2	0	0	2	3	2	3	3	3	0	1	3	2	2	3	3	3	3
8	3	3	3	3	4	5	5	3	2	0	5	3	3	3	0	3	3	4	3	3	2	2	1	1

В дальнейшем, используя известные зависимости [5] и учитывая конкретные параметры планируемого к установке ветрогенератора, его выходную мощность можно оценить следующим образом:

$$P = C_p S \rho \frac{V^3}{2}, \tag{4}$$

где C_p - характеристика, определяемая аэродинамическими свойствами генератора;

S – площадь, покрываемая лопастями генератора при вращении, $S = \frac{\pi D^2}{4}$;

ρ – плотность воздуха;

V – скорость ветра.

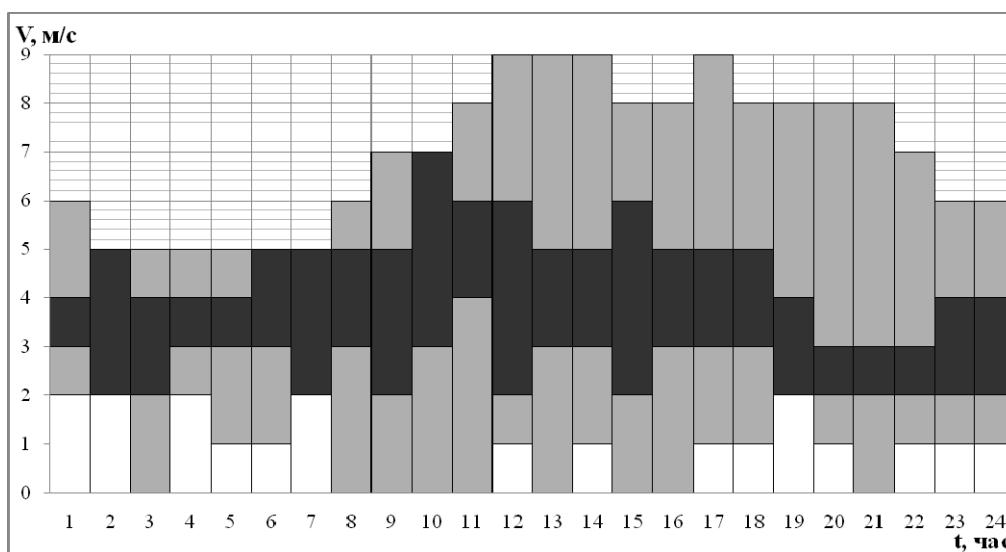


Рис. 1. Интервальный график суточного изменения скорости ветра

В конкретных расчетах значение показателя C_p выбирается по специальным кривым в зависимости от типа ветрогенератора и величины [6]

$$\lambda = \frac{\omega D}{2V},$$

где ω - угловая скорость ротора ветровой турбины.

На практике часто принимают

$$C_p = (0,3...0,8) C_{p \max},$$

где $C_{p \max}$ – так называемый теоретический предел Бетца, $C_{p \max} = 0,5926$.

Естественно, что при ориентации на интервальные графики, характеризующие скорость ветра, величина мощности ветрогенератора (4) также будет представлена интервальной величиной $(\underline{P}_{вг}, \overline{P}_{вг})$.

Выводы

В процессе кардинального реформирования электроэнергетической отрасли с перспективой формирования интеллектуальных электрических сетей особую актуальность приобретают вопросы качества информационного обеспечения задач оптимального управления их режимами. В этом плане интерес представляют описанные в данной статье подходы, связанные с повышением адекватности оценок электрических нагрузок. Основное внимание уделено вопросам корректного применения косвенной информации (данных об электропотреблении, типовых графиков нагрузок и отдельных характеристик источников распределенной генерации), а также способам учета фактического уровня неопределенности используемых исходных данных. Полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы в процессе моделирования электрических нагрузок и режимов распределительных сетей.

Литература

1. Праховник А.В. Требования и общие принципы организации базы данных для решения задач моделирования и оптимизации режимов в современных системах электроснабжения / А.В.Праховник, В.А. Попов, В.В. Ткаченко, Е.С. Луцько // Енергетика: економіка, технології, екологія / Наук. журнал. – 2010. –№1.
2. Мушик Э. Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер; перевод с нем. Н.В. Васильченко, В.А. Душский - М.: Мир, 1990. - 206 с.
3. Вартазаров И.С. Экспертные оценки и их применение в энергетике / И.С. Вартазаров, И.Г.Горлов, Е.В. Минаев, Р.М. Хвастунов; под ред. Р.М. Хвастунова – М.:Энергоиздат,1981.- 188 с.
4. Попов В.А. Досвід використання неформальних методів при моделюванні та керуванні режимами систем електропостачання / В.А. Попов // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2000. - № 1 (9). - С. 9 - 15.
5. Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах электроснабжения / А.В. Праховник – К: Освіта України, 2007. - 462 с. – 500 экз. - ISBN 978-966-8847-61-5.
6. Farret F.A. Integration of alternative sources of energy / F.A. Farret, Godoy M. Simoes. - A. John Wiley and Sons, Inc., Publication, 2006. - 471 p.