

УДК 621.316

В.А. ПОПОВ, Е.С. ЯРМОЛЮК, С. БАНУЗАДЕ САХРАГАРД, К.Ю. ГУРА

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

4 АКТУАЛИЗАЦИЯ ОЦЕНОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ ПО ДАННЫМ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ

V. POPOV, E. IARMOLIUK, S. BANUZADE SAHRAGARD, K. GURA

ACTUALIZATION OF ELECTRICAL LOAD ESTIMATES IN DISTRIBUTION NETWORKS USING REMOTE MEASUREMENTS

Анотация. Эффективное функционирование электрических сетей невозможно без качественного и надежного информационного обеспечения. Данное требование особенно становится актуальным в процессе внедрения Smart технологий. В Украине в ближайшее время по многим причинам трудно рассчитывать, что распределительные сети будут обеспечены средствами измерений и передачи данных в объеме, достаточном для моделирования и управления режимами в реальном времени. В связи с этим актуальной задачей остается учет фактора неопределенности информации.

В предыдущих публикациях были рассмотрены вопросы использования интервального анализа и теории нечетких множеств для моделирования электрических нагрузок и их суточных графиков. В данной статье предложен эвристический алгоритм, который, используя данные телеизмерений суммарной нагрузки группы узлов электрической сети, позволяет осуществить их актуализацию, т.е., по сути, оценку в реальном времени. В процессе реализации данного алгоритма имеется возможность существенно снизить уровень неопределенности представляемых в виде L-R нечетких чисел оценок нагрузок отдельных узлов сети, а также имеющихся источников распределенной генерации.

Ключевые слова: актуализация электрических нагрузок, функция принадлежности, нечеткие оценки нагрузок, неопределенность информации.

Аннотация. Эффективное функционирование электрических сетей невозможно без качественного и надежного информационного обеспечения. Данное требование особенно становится актуальным в процессе внедрения Smart технологий. В Украине в ближайшее время по многим причинам трудно рассчитывать, что распределительные сети будут обеспечены средствами измерений и передачи данных в объеме, достаточном для моделирования и управления режимами в реальном времени. В связи с этим актуальной задачей остается учет фактора неопределенности информации.

В предыдущих публикациях были рассмотрены вопросы использования интервального анализа и теории нечетких множеств для моделирования электрических нагрузок и их суточных графиков. В данной статье предложен эвристический алгоритм, который, используя данные телеизмерений суммарной нагрузки группы узлов электрической сети, позволяет осуществить их актуализацию, т.е., по сути, оценку в реальном времени. В процессе реализации данного алгоритма имеется возможность существенно снизить уровень неопределенности представляемых в виде L-R нечетких чисел оценок нагрузок отдельных узлов сети, а также имеющихся источников распределенной генерации.

Ключевые слова: актуализация электрических нагрузок, функция принадлежности, нечеткие оценки нагрузок, неопределенность информации.

Annotation. Effective operation of electrical networks is impossible without reliable information. This requirement especially becomes actual in the course of implementation of Smart technologies. In Ukraine in the near future, for many reasons, it is difficult to assume that distribution networks will be provided by equipment for measuring and data transmission in volume sufficient for their modeling and operation in real time. In this connection the consideration of the factor of uncertainty of the information becomes the actual problem.

In the previous publications methods associated with using the interval analysis and the theory of fuzzy sets for modeling electrical loads and their daily curves have been considered. In this article the heuristic algorithm which, using the real time data of remote measurements of total load of several busses of electrical network is offered to carry out their actualization. In the process of this algorithm realization there is possible to reduce essentially the level of uncertainty of load estimates of certain busses (as well as sources of the distributed generation), which are given in the form of L-R fuzzy numbers.

Key words: actualization of electrical loads, membership function, fuzzy estimates of loads, the uncertainty information.

Введение

Как уже подчеркивалось в [1], успешная реализация новой стратегии организации электроэнергетики, в первую очередь, сектора распределения электрической энергии на основе Smart Grid идеологии, невозможна без формирования адекватной информационной среды. Вместе с тем, следует признать, что в ближайшей перспективе (по крайней мере, в Украине) трудно рассчитывать на полную автоматизацию процессов управления распределительными сетями, возможность полноценного моделирования их режимов в реальном времени. Прежде всего, это связано с отсутствием материальных возможностей для охвата всех потребителей или даже только нагрузочных узлов (ТП) распределительных линий средствами телеизмерений и дистанционного управления, создания адекватной (по техническим параметрам и объему) сети передачи данных. В подавляющем числе отечественных распределительных энергокомпаний процесс внедрения систем SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) находится только на начальной стадии.

В то же время, естественно, процесс информатизации электрических сетей постепенно развивается, и нужно быть готовым к более широкому применению в ряде узлов сети новых многофункциональных цифровых измерительных устройств (IED – Intelligent Electronic Devices). В качестве последних можно рассматривать не только различные измерительные комплексы, устанавливаемые на подстанциях, но также организованные соответствующим образом системы АСКУЭ, многофункциональные счетчики, размещаемые помимо подстанций на некоторых РП, ТП, у отдельных потребителей и источников распределенной генерации. Аналогичные функции имеют возможность выполнять и создаваемые коммутационные (секционированные) пункты (например, на базе реклоузеров), оснащаемые вакуумными выключателями, микропроцессорными комплексами релейной защиты, средствами измерения основных параметров режимов, соответствующими портами для подключения устройств передачи данных.

Перечисленные выше технические средства позволяют получить актуальную информацию о параметрах режима, которую, безусловно, целесообразно использовать в задачах моделирования режимов электрических сетей. Однако в подавляющем большинстве случаев результаты указанных измерений характеризуют параметры режима определенных зон распределительной сети и не отражают нагрузку конкретных потребителей (или нагрузочных узлов). Следовательно, актуализация оценок отдельных нагрузок, которые изначально формируются в основном на основе различных ретроспективных данных [2] и косвенных характеристик, возможна только за счет использования оперативных данных, получаемых совокупно для группы потребителей или узлов сети.

Задача коррекции (или даже определения) нагрузок узлов распределительной сети по значениям соответствующих параметров, измеренных на головных участках линий, является достаточно традиционной в практике моделирования режимов [3]. Однако при ее решении в современных условиях необходимо дополнительно учесть ряд важных факторов. Например, среди узлов сети, для которых осуществляется актуализация нагрузок, могут находиться и узлы с генерирующими источниками. Кроме этого, в [1] было показано, что оценки электрических нагрузок могут по-разному отражать уровень неопределенности исходной информации и, соответственно, будут представляться в различной форме. Соответственно, аналогичным образом необходимо будет интерпретировать и актуализированные нагрузки. Из этого следует, что предлагаемый для цели актуализации нагрузок алгоритм должен давать возможность оперировать с различными (с точки зрения формы учета неопределенности информации) исходными данными и опираться на соответствующий (адекватный конкретной информационной среде) математический аппарат. Помимо этого, не менее важно, чтобы применение данного математического аппарата не приводило к чрезмерному увеличению неопределенности определяемых (актуализированных) значений нагрузок.

1 Основные принципы построения процедур актуализации электрических нагрузок

Оценки измеряемой в реальном времени суммарной нагрузки формируются на основании некоторого количества предшествующих измерений. При этом как количество измерений, так и интервалы времени, через которые они осуществлялись, могут варьироваться в очень широких пределах и для их обоснованного выбора необходимо учитывать несколько обстоятельств.

В настоящее время в распределительных сетях, при решении задач оперативного характера (когда необходимо знание актуальных нагрузок), в основном, требуется контролировать такие технические характеристики как допустимость загрузки элементов сети, величина потерь напряжения, значения токов короткого замыкания. Для большинства из указанных целей, в принципе, достаточно использовать значения нагрузок, усредненные за интервал времени порядка 30 минут. Но при этом было бы желательно, чтобы графики нагрузки узлов сети (типовые, а, соответственно, и интегральные

для групповой нагрузки) также были бы сформированы по аналогичному принципу. В действительности же в большинстве случаев, используемые сейчас типовые графики нагрузки строятся исходя из часового усреднения нагрузок. Соответственно, и формируемые на их основе интегральные групповые графики будут представлены в аналогичной форме. Естественно, при этом адекватность параметров, моделируемых (актуализируемых) на основе осредненных за меньшие промежутки времени результатов оперативных измерений суммарной нагрузки группы узлов сети, будет существенно ниже, и такой подход в значительной мере теряет свой смысл.

Анализируя принципы построения блока формирования электрических нагрузок в современных информационно – вычислительных системах [1], можно выделить две характерные ситуации с точки зрения представления неопределенности исходных данных, участвующих в процедуре формирования оценок электрических нагрузок.

Если типовые графики и результаты измерений нагрузки (прямые, косвенные, ретроспективные) представлены в детерминированной форме, то и определяемые расчетные нагрузки отдельных потребителей или узлов сети также будут детерминированными. Данный результат не зависит от того, в каком виде учитывались ретроспективные измерения: вообще не учитывались; использовались усредненные значения результатов измерений; формировался усредненный график на основе анализа семейства частных графиков, построенных в соответствии с каждым из имеющихся измерений; из семейства частных графиков выбирался наиболее представительный [4].

В этих условиях процедура актуализации нагрузок является достаточно тривиальной: разность между суммарной нагрузкой узлов сети и измеренной величиной их общей нагрузки для каждого периода времени распределяется пропорционально соответствующим нагрузкам отдельных узлов. В принципе представленный подход позволяет, при необходимости, учесть и такие факторы, как наличие источников распределенной генерации, потери мощности в элементах рассматриваемого фрагмента электрической сети.

$$P'_{it} = \frac{P_{\Sigma it} - \sum_{i=1}^n P_{it} - \sum_{j=1}^m \Delta P_{jt} + P_{p,ct}}{\sum_{i=1}^n P_{it}} P_{it}, \quad (1)$$

где $P_{\Sigma it}$ – измеренная актуальная нагрузка группы, содержащей n потребителей;

P_{it} – исходная оценка нагрузки i -го потребителя (узла сети);

ΔP_{jt} – потеря мощности в j -ом элементе сети (участке распределительной линии или распределительном трансформаторе);

$P_{p,ct}$ – мощность, генерируемая источником распределенной генерации в t -ом режиме;

P'_{it} – актуализированная оценка нагрузки i -го потребителя (узла сети).

Недостатки такого подхода хорошо известны. Это недостаточная адекватность получаемых детерминированных актуализированных значений нагрузок, а также невозможность обособанного учета неопределенности исходных оценок отдельных нагрузок в процессе их коррекции. Последний фактор является достаточно важным, т.к. во многих случаях исходные оценки нагрузок были сформированы для отдельных потребителей или узлов сети, ориентируясь на различные по объему, составу и «возрасту» исходные данные и, соответственно, степень коррекции таких нагрузок, в принципе, должна быть различной.

2 Учет неопределенности исходной информации при решении задачи актуализации электрических нагрузок

Учет неопределенности информации, включаемой в блок формирования электрических нагрузок современных информационно-вычислительных систем [4], связан с использованием интервальных типовых графиков нагрузок или детерминированных типовых графиков совместно с обобщенными нечеткими оценками нагрузок, которые формируются на основе анализа ретроспективных данных, путем применения специальных процедур [4]. Помимо этого, как было показано в [4], аналогичные нечеткие оценки могут быть построены и для генерирующих источников, при их наличии в анализируемом фрагменте распределительной сети.

Таким образом, в случае учета фактора неопределенности исходной информации в формируемых моделях, процедура актуализации исходных оценок электрических нагрузок связана с осуществлением определенных операций с нечеткими величинами. При этом важно подчеркнуть, что непосредственное применение алгоритма (1) или подобной расчетной схемы для

решения задачи актуализации нагрузок в случае, когда все или даже часть параметров представлено нечеткими величинами, не представляется возможным. Это связано со спецификой арифметических операций с нечеткими числами [5]. Данные операции накладывают определенные ограничения на участвующие в них нечеткие числа и, что самое главное, приводят к существенному увеличению неопределенности получаемых результатов. Приведенные соображения будут справедливы и в случае, когда оценки нагрузок заданы нечеткими числами $L-R$ типа [6], даже при применении специальных арифметических операций [7].

Ниже рассматривается один из возможных алгоритмов актуализации нечетких оценок нагрузок группы потребителей (узлов сети) по результатам телеизмерений их суммарной нагрузки. При этом функции принадлежности сформированных исходных нечетких оценок нагрузок используются только для определения их детерминированного аналога и количественной характеристики уровня неопределенности.

Допустим, замеры фактической нагрузки осуществляются поминутно (или через меньшие интервалы времени). Эти данные, накопленные за интервал времени 1 час, в принципе, позволяют определить закон распределения случайной величины нагрузки и вычислить все его параметры. В данном случае, опираясь на многочисленные исследования, априори принимаем гипотезу о нормальном законе распределения.

По аналогии с интерпретацией ретроспективных данных о нагрузках, что было рассмотрено в [4], оценка фактической измеренной нагрузки может быть представлена треугольной функцией принадлежности (рис. 1), где P_m – соответствует математическому ожиданию измеряемой величины, границы функции принадлежности определяются величиной среднеквадратичного отклонения σ и, учитывая объем измерений, принимаем $\max \mu(P) = 1,0$.

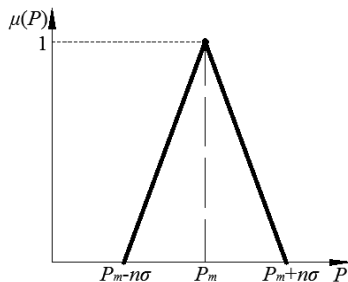


Рис. 1. Оценка фактической измеренной нагрузки в виде треугольной функции принадлежности

В свою очередь, исходные обобщенные оценки нагрузки потребителей или узлов электрической сети рассматриваются как трапециевидные [4] (или, в частном случае, треугольные) нечеткие числа $L-R$ типа (рис. 2).

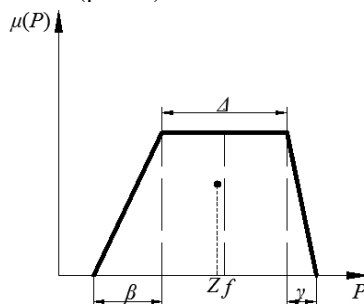


Рис. 2. Оценка фактической измеренной нагрузки в виде трапециевидной функции принадлежности

В этом случае соответствующие функции принадлежности описываются следующим образом:

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 - \frac{f - \frac{\Delta}{2} - x}{\beta}, & \text{если } f - \frac{\Delta}{2} - \beta \leq x \leq f - \frac{\Delta}{2} \\ 1, & \text{если } f - \frac{\Delta}{2} \leq x \leq f + \frac{\Delta}{2} \\ 1 - \frac{x - f - \frac{\Delta}{2}}{\gamma}, & \text{если } f + \frac{\Delta}{2} \leq x \leq f + \frac{\Delta}{2} + \gamma \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Таким образом, основными характеристиками нечетких чисел подобного типа являются середина интервала толерантности f , его ширина Δ , левый и правый коэффициенты неопределенности β и γ .

Очевидно, что, учитывая принципы формирования исходных нечетких оценок нагрузок узлов [4], в общем случае, максимальные значения функций принадлежности могут быть различны. С целью соблюдения принципа обобщения Заде при выполнении на последующих шагах любых операций с нечеткими числами функции принадлежности исходных оценок нагрузок трансформируются в соответствии с условием $A_\alpha = x | \mu_A(x) \leq \alpha$. Другими словами, после этой операции функции принадлежности всех нагрузок, участвующих в процессе актуализации, будут иметь одинаковое максимальное значение, определяемое наименее достоверной оценкой нагрузки и могут быть описаны параметрами $f_\alpha, \Delta_\alpha, \beta_\alpha, \gamma_\alpha$ и $\mu_\alpha(x) = \min_i \mu_i(x)$. Соответственно, после осуществления процедуры актуализации все полученные функции принадлежности могут быть пронормированы и приведены, таким образом, к стандартному виду ($\max \mu_i(x) = 1$).

Как уже указывалось выше, в силу ряда причин, процедура актуализации нагрузок должна строиться таким образом, чтобы максимально исключить арифметические операции над нечеткими числами. В связи с этим предлагаемый эвристический алгоритм базируется на следующих соображениях. Если вместо нечетких оценок нагрузок рассматривать их детерминированные аналоги, представленные, например, центрами тяжести исходных функций принадлежности, то коррекция нагрузок может осуществляться в соответствии с (1).

При учете неопределенности исходной информации, актуализированные оценки нагрузок, по аналогии с исходными, будут представлены трапециевидными (треугольными) нечеткими числами $L-R$ типа. Ширина интервала толерантности скорректированной оценки должна зависеть от аналогичного показателя исходной функции принадлежности и ее максимального значения, которое отражает объем данных, используемых для построения данной оценки, а следовательно, и степень ее неопределенности. Аналогичные соображения могут быть также применены для определения левого и правого коэффициентов нечеткости актуализированных нечетких оценок нагрузок.

Необходимо отметить, что здесь отсутствуют основания для использования традиционных показателей размытости нечетких множеств, определяемых через энтропию, а также на основе метрического или аксиоматического подходов.

Таким образом, алгоритм актуализации нагрузок имеет следующую структуру.

1. На основании исходных функций принадлежности вычисляются коэффициенты коррекции для каждой i -ой оценки нагрузки (узла нагрузки):

$$K_i = Z_i, K_{ki} = (1 - \mu_i) \frac{\Delta_i}{Z_i}, K_{li} = \frac{\beta_i}{f_i - \frac{\Delta_i}{2}}, K_{ri} = \frac{\gamma_i}{f_i + \frac{\Delta_i}{2}},$$

и для каждого j -го источника распределенной генерации (РГ):

$$K_{p,j} = Z_{p,j}, K_{kp,j} = (1 - \mu_{p,j}) \frac{\Delta_{p,j}}{Z_{p,j}}, K_{lp,j} = \frac{\beta_{p,j}}{f_{p,j} - \frac{\Delta_{p,j}}{2}}, K_{rp,j} = \frac{\gamma_{p,j}}{f_{p,j} + \frac{\Delta_{p,j}}{2}},$$

где $Z_i, Z_{p,j}$ – детерминированный аналог (например, центр тяжести) исходной нечеткой оценки нагрузки и источника РГ соответственно (рис. 2).

В качестве аргументации данной фазы расчетов можно указать на следующее. Даже интуитивно понятно, что, например, при одинаковой ширине (4 кВт) интервал толерантности 6 – 10 кВт имеет большую степень неопределенности по сравнению, скажем, с интервалом толерантности 66 – 70 кВт. Аналогичные соображения можно высказать и относительно коэффициентов нечеткости чисел $L - R$ типа.

2. Осуществляем нормирование корректирующих коэффициентов для источников РГ:

$$K'_{p,j} = \frac{K_{p,j}}{\sum_j K_{p,j}}, K'_{kp,j} = \frac{K_{kp,j}}{\sum_j K_{kp,j}}, K'_{lp,j} = \frac{K_{lp,j}}{\sum_j K_{lp,j}}, K'_{rp,j} = \frac{K_{rp,j}}{\sum_j K_{rp,j}}.$$

3. Определяем основные характеристики актуализированных нечетких оценок источников РГ (рис. 3):

$$f'_{p,\alpha} = \left(\sum_j f_{p,j} \right)_\alpha K'_{p,\alpha}, \quad \Delta'_{p,\alpha} = \left(\sum_j \Delta_{p,j} \right)_\alpha K'_{Kp,\alpha}, \quad \beta'_{p,\alpha} = \left(\sum_j \beta_{p,j} \right)_\alpha K'_{Lp,\alpha},$$

$$\gamma'_{p,\alpha} = \left(\sum_j \gamma_{p,j} \right)_\alpha K'_{Iп,\alpha}. \quad (2)$$

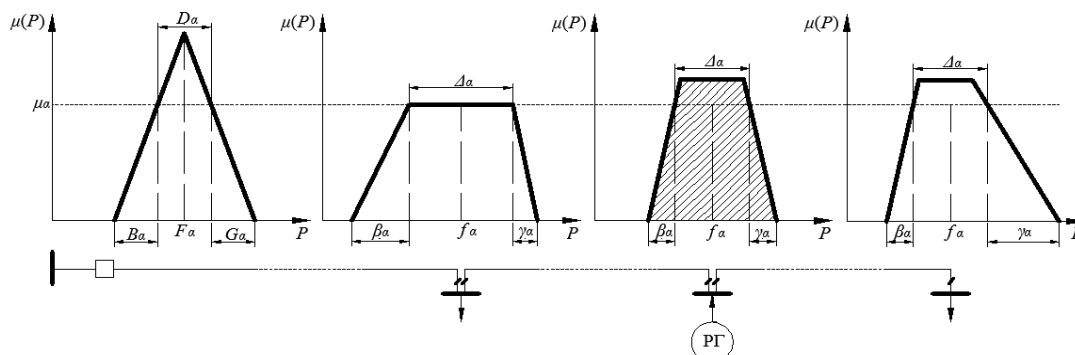


Рис. 3. Процедура актуализации нечетких оценок электрических нагрузок

4. Осуществляем нормирование корректирующих коэффициентов нагрузок узлов:

$$K'_i = \frac{K_i}{\sum_i K_i}, \quad K'_{Ki} = \frac{K_{Ki}}{\sum_i K_{Ki}}, \quad K'_{Li} = \frac{K_{Li}}{\sum_i K_{Li}}, \quad K'_{Iи} = \frac{K_{Iи}}{\sum_i K_{Iи}}.$$

5. Определяем основные характеристики актуализированных нечетких оценок нагрузок (рис. 3):

$$f'_{i\alpha} = \left[F_\alpha + \left(\sum_j f_{p,j} \right)_\alpha \right] K'_i, \quad \Delta'_{i\alpha} = \left[D_\alpha + \left(\sum_j \Delta_{p,j} \right)_\alpha \right] K'_{Ki}, \quad \beta'_{i\alpha} = \left[B_\alpha + \left(\sum_j \beta_{p,j} \right)_\alpha \right] K'_{Li},$$

$$\gamma'_{i\alpha} = \left[G_\alpha + \left(\sum_j \gamma_{p,j} \right)_\alpha \right] K'_{Iи}. \quad (3)$$

Очевидно, что сформированные в результате выполнения данного алгоритма оценки будут обладать неоправданно низким уровнем неопределенности. Их дополнительное размытие может быть достигнуто исходя из следующих соображений. Логично предположить, что чем больше количество узлов, либо количество источников PГ, для которых одновременно осуществляется коррекция нагрузок по их измеренной суммарной фактической нагрузке, тем выше должен быть уровень неопределенности конечных оценок. Это выглядит естественным, поскольку при увеличении числа узлов, либо числа источников PГ, теоретически возрастает количество возможных комбинаций отдельных нагрузок, либо источников PГ, которые имеют одинаковую сумму. С другой стороны, если корректируется единичная нагрузка, либо один источник PГ, то дополнительного размытия полученной оценки не должно быть – она будет идентична характеристике измеренной нагрузки, либо источника PГ. В связи с этим в выражения (2) и (3) предлагается ввести дополнительный поправочный коэффициент (s), создающий дополнительное размытие сформированных оценок

$$s = (\sqrt{n})^p,$$

где n – количество актуализируемых нагрузок и количество актуализируемых источников PГ соответственно;

p – показатель, определяющий степень дополнительного размытия, который желательно определять экспериментальным путем.

Аргументацией такого подхода служат следующие соображения. Очевидно, что в линии с n равномерно распределенными нагрузками вариация суммарной нагрузки будет в \sqrt{n} раз меньше, чем вариация отдельных нагрузок. В свою очередь, вариация в определенной мере характеризует

степень неопределенности нагрузок. В рассматриваемом алгоритме, по сути, возникает обратная задача: оценить степень неопределенности отдельных нагрузок, зная характер неопределенности суммарной нагрузки. Соответственно, можно предположить, что уровень неопределенности нагрузок отдельных узлов сети увеличится (по сравнению с неопределенностью измеренной суммарной нагрузки) в \sqrt{n} раз.

Выводы

В статье рассматривается подход, позволяющий учесть актуальную информацию об электрических нагрузках, получаемую путем телеизмерений, для повышения эффективности и обоснованности принимаемых решений в задачах оперативного характера, решаемых на уровне СЭС. Важной характеристикой рассматриваемых процедур является учет особенностей информационного и программного обеспечения, имеющих место в большинстве распределительных энергокомпаний, когда получение всеобъемлющих данных об электрических нагрузках в реальном времени не представляется возможным. Описанная модель была протестирована на ряде энергетических объектов, где продемонстрировала свою адекватность [8]. Вместе с тем, очевидно, что предложенный в работе алгоритм носит эвристический характер, требует более глубокого экспериментального изучения и, скорее всего, не является безальтернативным подходом к решению рассматриваемой задачи.

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 // Энергетика: економіка, технології, екологія / Наук. журнал. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010. – № 1. – С. 42 – 47. – Бібліогр.: С. 47. – 150 прим. – ISSN 1813-5420.
2. Попов В.А. Принципы учета неопределенности исходной информации при моделировании нагрузок в распределительных сетях / В.А. Попов, Е.С. Ярмолук, С. Банузаде Сахрагард, А.А. Журавлев // Энергетика: економіка, технології, екологія / Наук. журнал. – Київ: НТУУ «КПІ», 2011. – № 1. – С. 61 – 66. – Бібліогр.: С. 66. – 150 прим. – ISSN 1813-5420.
3. Маркушевич Н.С. Автоматизированная система диспетчерского управления / Н.С. Маркушевич. - М: Энергоатомиздат, 1986, 136 с., ил. - Библиогр.: С. 130 – 131 (35 назв.).
4. Попов В.А. Пути повышения эффективности моделирования электрических нагрузок в современных системах электроснабжения / В.А. Попов, А.А. Журавлев, В.Н. Сидоренко, В.И. Степанова // Энергетика: економіка, технології, екологія / Наук. журнал. – Київ: НТУУ «КПІ», 2010. – № 2. – С. 97 – 103. – Бібліогр.: С. 103. – 150 прим. – ISSN 1813-5420.
5. Борисов А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров – Рига: Зинатне, 1990. – 184 с.
6. Аверкин А.Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун, В.Б. Силов, В.Б. Тарасов; под ред. Д.А. Пospelова – М.: Наука, 1986. – 312 с.
7. Яхьяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: Уч. пособие / Г.Э. Яхьяева – М.: Бином, 2006. – 316 с. – ISBN 5-94774-510-0.
8. Popov V.A., Fuzzy logic in real time state estimation of distribution systems / V.A. Popov, P.Ya. Ekel, M. Fucks // Methodologies for the Conception, Design, and Application of Intelligent Systems / World Scientific. – 1998. – V 2. – P. 136 – 139. – Библиогр.: С. 139.