УДК 004.9 Дата подачи статьи: 28.02.21, после доработки: 22.03.22
DOI: 10.15827/0236-235X.138.240-245 2022. Т. 35. № 2. С. 240–245

Автоматизация оценки состояния электросети в удаленных районах России с использованием смарт-структур

Ю.С. Шевнина [1], *к.т.н., доцент, yusm@rambler.ru*

[1] *Институт системной и программной инженерии и информационных технологий НИУ МИЭТ, г. Москва, г. Зеленоград, 124498, Россия*

В статье рассматривается способ автоматизации оценки состояния электросети в удаленных районах России с использованием смарт-структур. Предлагаемый способ реализован в виде мобильного приложения. Смарт-структура, лежащая в основе данного способа, состоит из модулей получения и обработки данных с датчиков, поиска закономерностей характеристик электросети и формирования классификаторов состояний, рекомендаций по ремонту и оптимальному режиму эксплуатации электросети и подстанции.

Научная новизна предлагаемого решения заключается в методе анализа и обработки характеристик электросети и их совокупностей. Кроме того, учитываются параметры внешних воздействий в виде природных и техногенных факторов. Метод анализа и обработки информации об электросети и подстанции основан на машинном обучении – логическом анализе данных. Оценка состояния электросети и подстанции важна при исследовании и решении задач прогнозирования изменения состояния электросети, подбора рекомендаций и принятия решений о ремонтных и обслуживающих работах.

Метод оценки состояния электросети основан на поиске закономерностей и построении классификаторов и позволяет учитывать все характеристики и параметры электросети, их совокупность и связи между ними. Он также дает возможность анализировать и получать закономерности для неполных и неточных данных, с чем достаточно часто приходится сталкиваться в реальных электросетях. Метод может быть использован при проектировании и обслуживании электросетей и подстанции в труднодоступных и удаленных регионах Российской Федерации.

Предлагаемая редукция закономерностей характеристик и их совокупностей на основе их рекуррентной конъюнкции позволяет получать оптимальные классификаторы состояний электросети и подстанции с высокой интерпретируемостью и обобщенностью, что увеличивает точность оценки состояния электросети и, как следствие, точность прогноза поведения, рекомендаций и принятия решений о ремонтных работах и оптимальном режиме эксплуатации.

Ключевые слова*: автоматизация оценки состояния, логический анализ данных электросети, мобильное приложение для электроподстанции, обработка информации, машинное обучение, поиск закономерностей, построение классификаторов.*

В Российской Федерации огромное количество населенных пунктов удалены от централизованного электроснабжения и имеют слабые транспортные связи с промышленно развитыми районами [1]. В частности, в Томской области 21 населенный пункт с суммарным населением в 33 700 человек изолирован от распределительных электрических сетей. Существующие системы мониторинга электросетей устарели и требуют постоянного присутствия дежурных операторов. Информирование ремонтных бригад о неисправностях и сбоях в работе электросети слабое, и, по данным Минэнерго, время его может составлять более суток [2]. Таким образом, надежное и качественное электроснабжение удаленных районов России на сегодняшний день особенно актуально.

Причинами проблем электроснабжения удаленных районов [3] являются следующие: плохое техническое состояние электросетей, дальняя транспортировка топлива и зависимость от его поставок, ограниченность сроков сезонного завоза топлива, слабое развитие транспортной инфраструктуры, зависимость от бюджетного финансирования.

В настоящее время в качестве средства мониторинга состояния электросети используются специализированные программно-аппаратные средства, различные АСУ ТП, требующие специальной подготовки операторов. Проведенный аналитический обзор источников относительно автоматизации работы электросетей и электроподстанций показал, что предлагаемые решения схожи по функционалу и позволяют контролировать процесс пере-

дачи и распределения электроэнергии, снизить затраты на техническое обслуживание, повысить общую безопасность электросети и пр. Наиболее популярными являются решения «под ключ» от компаний «ОЛАЙСИС» и «Экнис-Инжиниринг». По данным Минэнерго (https://minenergo.gov.ru/node/11201), в удаленных районах России часть автоматизированных программно-аппаратных комплексов устарели и не позволяют в полной мере оценивать состояние электросети и электроподстанции. Внедрение новых решений зачастую невозможно из-за низкого бюджетного финансирования. Кроме того, подобные программно-аппаратные комплексы не учитывают влияние воздействий природного и техногенного характера, не имеют возможности составлять оптимальный режим эксплуатации электроподстанций с учетом их текущего состояния в природной и техногенной ситуациях. Для информирования ремонтных бригад дежурные группы операторов используют имеющиеся каналы связи. Отсутствует автоматическая фиксация нарушений и сбоев в режиме работы электросети и высокой нагрузки электроподстанции.

Для решения данных проблем предлагается разработать мобильное приложение оценки состояния электросети и выбора оптимального режима эксплуатации подстанции. Оно позволит своевременно информировать операторов и ремонтные бригады о неисправностях и сбоях в работе электросети, выбирать оптимальные режимы эксплуатации электроподстанций, тем самым снизив производственные затраты на обслуживание электросетей [4].

Мобильное приложение оценки состояния электросети на основе смарт-структуры

Предлагаемое мобильное приложение работает на основе смарт-структуры, состоящей из модулей сбора данных с различных датчиков, анализа и обработки полученных данных, предоставления информации о состоянии электросети и рекомендаций по оптимальному режиму работы (рис. 1).

Для анализа и обработки электромагнитных данных (напряжение, сила тока, сопротивление и т.д.) и данных природного и техногенного характера (температура, влажность, сила ветра, землетрясение и т.п.), полученных с различных датчиков и устройств, применяются методы машинного обучения, в частности, логический анализ данных [5]. Использование этого метода в предлагаемой смарт-структуре позволяет получать закономерности и классификаторы, учитывающие все характеристики электросети, внешние воздействия природного и техногенного характера и их совокупность, что обусловливает повышение точности оценки состояния электросети и подстанции, а следовательно, точности прогноза изменения состояния электросети и рекомендаций по оптимальному режиму работы и необходимым ремонтным и обслуживающим работам.

Определение закономерностей и формирование классификаторов состояния электросети основаны на последовательном анализе характеристик электросети и внешних воздействий и их совокупностей на соответствие выбранному признаку [6]. В закономерность попадают те характеристики и их закономерности, которые полностью покрывают классификационный признак состояния электросети и подстанции, то есть соответствуют ему. Из закономерностей формируются классификаторы состояний электросети. Как правило, данные о состоянии электросети и подстанции неполные и неточные. В таких случаях для построения классификаторов и оценки состояния электросети следует использовать закономерности с частичным покрытием классификационного признака. При этом необходимо заранее определить ограничения и погрешности на покрытие.

С учетом ограничений, погрешностей и параметров оптимизационной модели получим закономерности с небольшой степенью и максимальным покрытием. Увеличение количества характеристик электросети и внешних воз-

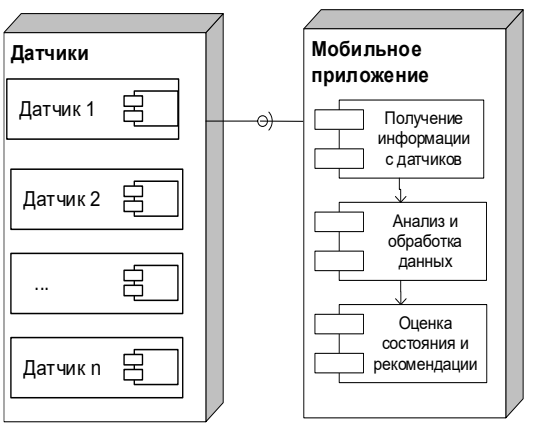

Рис. 1. Структурная схема мобильного приложения по оценке состояния электросети

Fig. 1. A structural diagram of a mobile application for assessing the power grid state

действий с низким покрытием классификационного признака приводит к снижению информативности формируемых закономерностей. Решить эту проблему позволяет максимальное увеличение степени уже сформированных закономерностей при сохранении количества покрываемых наблюдений своего класса [7].

В результате применения процедуры увеличения степени закономерностей характеристик электросети и их совокупностей для неполных и неточных данных получается классификатор, состоящий из логических правил с максимальным покрытием и степенью выше исходной. Обобщающая способность полученного классификатора выше исходной, что обусловлено сокращением количества характеристик электросети и внешних воздействий с низким покрытием выбранного классификационного признака.

Редукция построенного классификатора состояний электросети производится на основе рекуррентной конъюнкции закономерностей с учетом ограничений и погрешностей покрытий классификационного признака. Закономерности, не соответствующие ограничениям и погрешности покрытий, удаляются из классификатора [8]. Удаляются также закономерности, для которых количество наблюдений, противоположных признаку состояния, ниже, чем у оставшихся в классификаторе (рис. 2). Таким образом, редукция классификатора заключается в следующем:

– определение значения количества наблюдений, противоположных классификационному признаку состояния, для каждой закономерности в исходном классификаторе;

– сортировка закономерностей в порядке убывания значения количества противоположных наблюдений S_k для каждого класса;

– удаление закономерностей из классификатора с учетом погрешности и формирование из оставшихся новых классификаторов;

– проверка оптимальности классификатора; увеличение количества непокрытых наблюдений множества данных свидетельствует о недостаточности закономерностей в классификаторе.

Высокая точность классификации состояний электросети при редукции путем рекуррентной конъюнкции закономерностей обусловлена уменьшением среднего значения показателя наблюдений с низким покрытием классификационного признака и увеличением среднего значения показателя наблюдений с высоким покрытием признака для набора закономерностей каждого класса. Повышение интерпретируемости классификатора состояний электросети происходит за счет редукции, критерием остановки которой является увеличение количества непокрытых наблюдений множества данных [9].

Для повышения точности оценки состояния электросети и подстанции предлагается для каждой закономерности из полученных классификаторов определять весовой коэффициент a_i, физический смысл которого заключается в важности выбранной закономерности при ее наступлении на общее состояние электросети:

$$a_i = \frac{N_i}{M}, \quad (1)$$

где N_i – количество совпадений выделенной закономерности в классификаторах; M – общее количество классификаторов.

Весовой коэффициент закономерности принимает значение от 0 до 1: 1 – наиболее значимая закономерность при оценке состояния электросети и подстанции, 0 – закономерность не имеет значения для определения состояния электросети.

После определения весовых коэффициентов для каждой закономерности строится граф связанности $D = (V, E)$ для классификаторов

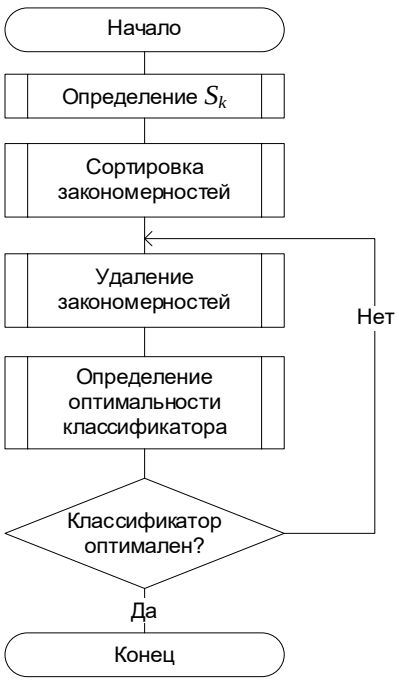

Рис. 2. Редукция классификатора

Fig. 2. Classifier reduction

состояний электросети, в котором вершинами V будут закономерности, а ребрами $E = (u, v)$: $u, v \in V$ – связи между ними; вес ребра равен значению весового коэффициента закономерности. Далее строится аналогичный по структуре граф связанности критериев оценки состояния электросети $D' = (V, E)$. В качестве критериев оценки состояния электросети и подстанции выступают нормативные и критические значения исследуемых характеристик и параметров. С учетом положений нечеткой логики осуществляется сравнение вершин двух графов:

$$V \subset V' \Leftrightarrow \forall v \in V : \mu_V(v) \le \mu_{V'}(v), \quad (2)$$

$$l(V \subset V') = \min_{v \in T} \mu_{V'}(v) : \quad T = \{v \in V; \mu_V(v) \le \mu_{V'}(v); \mu_V(v) > 0\}. \quad (3)$$

В случае положительного сравнения закономерности и соответствующего ему критерия происходит маркирование узла графа классификаторов состояний. Далее рассчитывается путь между маркированными узлами, который используется при расчете комплексной оценки состояния электросети и подстанции. Если $e_{i,j}$ – ребро, соединяющее вершины v_i и v_j, и весовая функция f: $E \to \mathbb{R}$, то путь G между маркированными узлами рассчитывается как

$$G = \sum_{i=1}^{n-1} f(e_i, e_{i+1}). \quad (4)$$

Особенность метода заключается в поочередном сравнении закономерностей характеристик электросети и их совокупностей с учетом их значимости и соответствующих им критериев оценки состояния электросети и подстанции, что позволяет уменьшить нечеткость сравниваемых множеств [10].

Значение комплексной оценки состояния электросети и подстанции находится в диапазоне от 0 до 1. При необходимости данный диапазон может быть разделен на конечное число диапазонов, каждому из которых ставится в соответствие набор рекомендаций по ремонту и оптимальному режиму эксплуатации электросети и подстанции. Административный и обслуживающий персонал получает сообщение о состоянии и режиме работы электросети и подстанции.

Блок-схема алгоритма получения оценки состояния электросети представлена на рисунке 3.

Заключение

Предложенный способ автоматизации процесса оценки состояния электросети и подстанции с использованием смарт-структур может быть использован при проектировании и обслуживании электросетей и электроподстанций в удаленных районах России. Разработанное на основе предлагаемого способа автоматизации мобильное приложение позволяет получать точную оценку состояния электросети и подстанции, что повышает точность рекомендаций по ремонту и оптимальному режиму эксплуатации электросети.

В процессе построения закономерностей и формирования классификаторов для оценки состояния учитываются все возможные характеристики электросети и подстанции, внешнее воздействие в виде природных и техногенных факторов, их совокупности и связи между ними. Проведенное стендовое тестирование мобильного приложения и имитационное моделирование различных нештатных ситуаций позволили рассчитать точность оценки состояния электросети, составившую 96 %. Точность рекомендаций по ремонту и оптимальному ре-

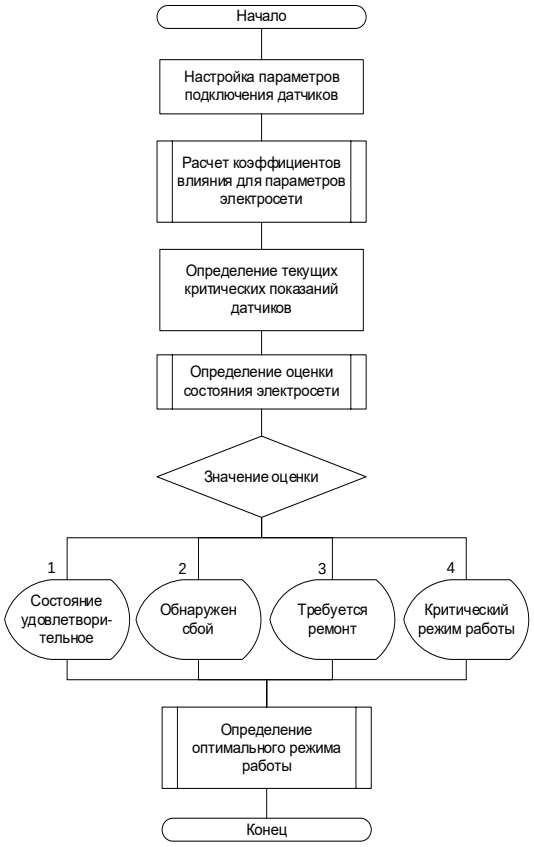

Рис. 3. Блок-схема алгоритма оценки состояния электросети

Fig. 3. A block diagram of the assessment algorithm for power grid state

жиму функционирования электросети и подстанции составила 89 %. Под точностью рекомендаций подразумевается, что предлагаемые действия позволяют улучшить или стабилизировать состояние электросети и препятствуют ее выходу из строя.

Литература

1. Барч Д.В. Совершенствование системы обслуживания устройств электроснабжения на основе мониторинга и диагностики // Изв. ПГУПС. 2012. № 3. С. 103–110.
2. Полуботко А.А. Системная надежность региональных электросетей // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2011. Т. 7. № 36. С. 64–68.
3. Чайка Л.В. Пространственные аспекты развития электроэнергетики Европейского Севера России // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2013. № 1. С. 84–97.
4. Gagarina L.G., Shevnina Ju.S., Chirkov A.V. On the issue of modeling complex nonlinear systems. Proc. CAMSTech-II, 2021, pp. 323–328.
5. Лекун Я. Как учится машина. Революция в области нейронных сетей и глубокого обучения; [пер. с франц.]. М.: Альпина нон-фикшн, 2021. 420 с.
6. Шевнина Ю.С. Метод декомпозиции сложной нелинейной системы на основе процессного подхода // СУИТ. 2021. № 3. С. 24–29. DOI: 10.36622/VSTU.2021.85.3.005.
7. Воропаева Н.В. Декомпозиция дискретных нелинейных систем с быстрыми и медленными переменными // Вестн. СамГУ. Естественно-научн. сер. 2010. № 4. С. 28–41.
8. Кузьмич Р.И., Масич И.С., Ступина А.А. Модели формирования закономерностей в методе логического анализа данных // СУИТ. 2017. № 1. С. 33–37.
9. Furnkranz J., Gamberger D., Lavrac N. Foundations of Rule Learning. Springer-Verlag Publ., 2012, 334 p. DOI: 10.1007/978-3-540-75197-7.
10. Zimmermann A., De Raedt L. Cluster grouping: From subgroup discovery to clustering. Machine Learning, 2009, vol. 77, no. 1, pp. 125–159. DOI: 10.1007/s10994-009-5121-y.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.138.240-245

Received 28.02.21, Revised 22.03.22
2022, vol. 35, no. 2, pp. 240–245

Automating the assessment of the power grid state in remote areas of Russia using smart structures

Yu.S. Shevnina [1], *Ph.D. (Engineering), Associate Professor, yusm@rambler.ru*

[1] *Institute of System and Software Engineering and Information Technologies,*
National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation

Abstract. The paper discusses a method for automating the assessment of the power grid state in remote regions of Russia using smart structures. The proposed automation method is implemented as a mobile application. The smart structure underlying the described method of automating the assessment of the power grid state consists of modules for receiving and processing data from sensors, searching for patterns in the power grid characteristics and generating state classifiers, offering recommendations for repair and optimal operation of the power grid and substation.

The scientific novelty of the proposed solution is in the method of analyzing and processing the power grid characteristics and their combinations. In addition, the external influence parameters in the form of natural and man-made factors are taken into account. The method of analyzing and processing information about the power grid and substation is based on the machine learning method – logical data analysis. Assessing the state of a power grid and a substation is important when studying and solving the problems of predicting changes in the power grid state, selecting recommendations and making decisions on repair and maintenance work.

The method for assessing the power grid state is based on the search for patterns and the construction of classifiers. It allows taking into account all the characteristics and parameters of a power grid, their totality and

the relationship between them. In addition, the described method allows analyzing and obtaining patterns for incomplete and inaccurate data, which is a fairly common occurrence in real power networks. The method can be used in the design and maintenance of power grids and substations in hard-to-reach and remote regions of the Russian Federation.

The proposed reduction of the characteristic regularities and their sets based on their recurrent conjunction makes it possible to obtain optimal classifiers of the states of a power grid and a substation with high interpretability and generalization. It increases the accuracy of assessing the power grid state, therefore, increases the accuracy of predicting behavior, recommendations and making decisions about repair work and the optimal mode operation.

Keywords: state assessment automation, power grid, electrical substation, optimal operation mode, machine learning, data mining, generating classifiers.

References

1. Barch D.V. Improvement of the service system based on monitoring and diagnostics of power supply equipment. *Proc. of Petersburg Transport University*, 2012, no. 3, pp. 103–110 (in Russ.).
2. Polubotko A.A. System reliability of regional electric networks. *National Interests: Priorities and Security*, 2019, no. 36, pp. 64–65 (in. Russ.).
3. Chayka L.V. Spatial aspects of electric power industry development in Russia's European north. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2013, no. 1, pp. 72–84 (in Russ.).
4. Gagarina L.G., Shevnina Ju.S., Chirkov A.V. On the issue of modeling complex nonlinear systems. *Proc. CAMSTech-II*, 2021, pp. 323–328.
5. Le Cun Y. *Quand la Machine Apprend: La Révolution des Neurones Artificiels et de L'apprentissage Profond*. 2019, 399 p. (Russ. ed.: Moscow, 2021, 420 p.).
6. Shevnina Yu.S. Decomposition method for a complex nonlinear system based on a process approach. *Control Systems and Information Technologies*, 2021, no. 3, pp. 24–29. DOI: 10.36622/VSTU.2021.85.3.005 (in Russ.).
7. Voropaeva N.V. Decomposition of discrete nonlinear systems with fast and slow variables. *Vestn. of Samara University. Natural Science Ser*., 2010, no. 4, pp. 28–41 (in Russ.).
8. Kuzmich R.I., Masich I.S., Stupina A.A. Models for formation of patterns in the method of logical analysis of data. *Control Systems and Information Technologies*, 2017, no. 1, pp. 33–37 (in Russ.).
9. Furnkranz J., Gamberger D., Lavrac N. *Foundations of Rule Learning*. Springer-Verlag Publ., 2012, 334 p. DOI: 10.1007/978-3-540-75197-7.
10. Zimmermann A., De Raedt L. Cluster grouping: From subgroup discovery to clustering. *Machine Learning*, 2009, vol. 77, no. 1, pp. 125–159. DOI: 10.1007/s10994-009-5121-y.

Для цитирования

Шевнина Ю.С. Автоматизация оценки состояния электросети в удаленных районах России с использованием смарт-структур // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 2. С. 240–245. DOI: 10.15827/0236-235X.138.240-245.

For citation

Shevnina Yu.S. Automating the assessment of the power grid state in remote areas of Russia using smart structures. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 2, pp. 240–245 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.138.240-245.