

УДК 621.382

**МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЦИФРОВЫХ ЭЛЕКТРОПОДСТАНЦИЙ****Дубров В.И., Оганян Р.Г., Шайхутдинов Д.В., Кириевский Е.В.,
Круглова Т.Н., Наракидзе Н.Д.***Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
Новочеркасск, e-mail: iimt-srstu@mail.ru*

Настоящая статья посвящена обзору методов и средств определения состояния сложных технических объектов, которые могут быть применены для диагностики цифровых подстанций. Для диагностики состояния электроподстанций применяются системы на базе экспертных оценок, системы на базе интеллектуальных методов, системы на базе аналитических моделей. Методы на основании интеллектуального анализа данных являются наиболее применимыми к оценке состояния сложных технических объектов типа цифровой подстанции. При этом указанные средства, методы функционируют на основе моделей типа «черный ящик», что не позволяет выполнить априорную оценку их точности и достоверности работы. Наиболее перспективными являются методы, реализующие комплексный подход с применением аналитических моделей и экспериментальных данных. Одним из таких методов является метод натурно-модельного эксперимента. Обоснована применимость данного метода к объекту диагностики. Разработан алгоритм работы системы диагностики с применением метода натурно-модельных испытаний.

Ключевые слова: преобразование электроэнергии, цифровая подстанция, экспертные системы диагностики, интеллектуальные средства диагностики, диагностика элементов подстанции

**METHODS AND APPROACHES FOR DETERMINING OF TECHNICAL STATE
OF DIGITAL POWER SUBSTATIONS****Dubrov V.I., Oganyan R.G., Shaykhutdinov D.V., Kirievskiy E.V.,
Kruglova T.N., Narakidze N.D.***Platov South-Russian State Polytechnical University (NPI), Novocherkassk, e-mail: iimt-srstu@mail.ru*

This article reviews the methods and means of determining the state of complex technical objects, which can be used for diagnosis of digital substations. The diagnostics of the state of the power substations are applied systems based on the expert assessments, systems based on intelligent methods, systems based on analytical models. Methods based on intelligent methods are the most applicable to the assessment of complex technical objects such as digital power substation. But mentioned means operate on the basis of the «black box» type models, which does not allow to estimate a priori assessment of their accuracy and reliability of operation. The most promising is the methods that implement a complex approach by using the analytical models and experimental data. One of these methods is the method of full-scale-model experiment. Applicability of this method to the diagnosis object is substantiated. The algorithm of the work of a diagnostic system is developed.

Keywords: electric power conversion, digital substation, expert diagnostic systems, intelligent diagnostics, diagnostics of substation elements

В связи с непрерывным ростом потребления электроэнергии [3, 5] актуальной является задача повышения надежности работы существующих распределительных электроподстанций и строительство новых. Первый вариант в условиях естественного старения оборудования, увеличения нагрузки и невозможности одновременного обновления всех элементов требует развития подходов, методов и средств определения состояния и диагностики всех элементов подстанции. В части строительства новых электроподстанций в настоящее время перспективным путем является переход к цифровым подстанциям, снабженным современными системами управления [2], цифровыми устройствами, в том числе измерительными [1] и технологиями преобразования информации [4]. При этом указанные технологии являются относительно новыми и не в полной мере

удовлетворяют требованиям по надежности и эффективности работы. В том числе данное утверждение верно и для технологий диагностики состояния цифровых подстанций, как сложных технических систем, и их отдельных элементов.

Цель работы: анализ методов и средств диагностики сложных технических систем и разработка подхода к определению состояния цифровых электроподстанций.

Материал и методы исследований: методы теории автоматического управления, элементов теории планирования эксперимента, теории измерений, методы решения обратных задач.

**Результаты исследования
и их обсуждение**

Цифровая подстанция построена на основе протокола МЭК 61850, в котором

предусмотрены стандартные средства для диагностики каналов связи между устройствами. Однако весьма важным вопросом является не только диагностика самих каналов передачи данных, но и диагностика силового оборудования [15]. Существующие методы диагностики сложных технических систем можно условно разделить на три класса:

1. Системы на базе экспертных оценок (экспертные компьютерные системы и системы, требующие привлечения эксперта-человека).

2. Системный анализ на базе интеллектуальных методов.

3. Системы на базе аналитических моделей.

К первому классу относятся следующие методы диагностики электроподстанций.

Диагностика состояния подстанции на основе сетей Петри [8]. Данный способ применяется для отражение текущей конфигурации подстанции (какие выключатели и линии введены в работу, а какие нет), на основе данных, полученных от SCADA-системы. Целью данного подхода является наискорейшее получение информации о текущей конфигурации подстанции.

Система-прототип «Telemanagement» [11]. Целью работы данной системы является удаленная диагностика отдельных свойств, характеризующих состояние подстанции. Данная система контролирует сооружение подстанции, оборудования среднего напряжения, трансформаторы и оборудование низкого напряжения. Система контролирует такие события, как: несанкционированный доступ, обнаружение пожара, короткое замыкание, падение напряжения, потеря напряжения и др. Фактически задачей данной системы является контроль подстанций, расположенных в труднодоступных местах. Благодаря данной системе, возможно направление ремонтной бригады на устранение неполадок в моменты возникновения неисправностей, что повлечет за собой уменьшение количества выездов на подстанцию.

Диагностика состояния подстанции на основе анализа изображений элементов подстанции [13]. Суть данного подхода заключается в том, что при возникновении аварийного сигнала диспетчеру передается изображение отдельных элементов подстанции: трансформатора, выключателя и др., благодаря которым возможно увидеть внешнее состояние оборудования. Помимо внешнего вида, данный подход позволяет определять значение некоторых параметров, информация о которых может быть доступна только в аналоговом виде на традиционной подстанции, например, показания электросчетчика.

Диагностика с использованием технологии 3D-ГИС [16]. Для диагностики используется трехуровневая структура, состоящая из слоя данных, слоя логики и слоя пользователя. Слой данных содержит базу данных SCADA, базу данных географической информационной системы (ГИС), а также базу экспертных данных. База данных ГИС включает в себя основные географические данные, данные трехмерной модели и данные атрибутов устройства. База данных SCADA в режиме реального времени содержит различные показатели работы оборудования, первичные и вторичные схемы подключения для электрооборудования. Слой логики обеспечивает контроль текущего состояния оборудования, т.е. при возникновении неполадок посылается запрос SCADA-системе для получения данных об оборудовании и в совокупности с анализом топологии 3D-ГИС, осуществляется получение места повреждения, и в сочетании с экспертной системой выявляется причина неисправности. Слой пользователя дает возможность просматривать состояние оборудования, какое оборудование неисправно, какие причины и как их устранить.

Аналогичные средства на основе экспертных систем представлены в работах [7, 9]. Недостатками представленных систем на базе экспертных оценок являются: отсутствие возможности выявления скрытых неисправностей электроподстанции; низкая степень эффективности оценки комплексного состояния подстанции.

Ко второму классу средств диагностики относятся следующие методы.

Диагностика на основе технологии мультиагентов [10]. Данный метод основан на понятии «агент», как программы, самостоятельно выполняющей задание, указанное пользователем, в течение длительных промежутков времени. В основе данной методики заложен диагностический агент, состоящий из нескольких субагентов, таких как агент диагностики трансформатора, агент диагностики выключателя, агент диагностики линии электропередач и диагностический агент подстанции. Каждый из агентов работает независимо друг от друга, т.е., если появляется нарушение в трансформаторе, например, межвитковое замыкание и его последующее отключение, начинает работать агент диагностики трансформатора, если отключилась линия, начинает работу агент диагностики линии и т.д. В результате последовательной диагностики и анализа данных измерений, комплексный диагностический агент получает информацию от всех субагентов и делается вывод о причине нарушения.

Диагностика неисправностей на основе RCA-метода [12]. Целесообразность применения данного метода заключается в том, что большинство существующих методов не способны осуществлять диагностику сложных неисправностей, включающих в себя несколько последовательных отказов или ложных срабатываний. Суть данного метода заключается в разбиении диагностики на 2 составляющие: с работой защитных устройств и без них. При нормальном режиме работы осуществляется диагностика текущего состояния оборудования через определенные промежутки времени. Первая составляющая диагностики оценивает текущее состояние элементов подстанции на основе анализа различных показателей, характеризующих их состояние. При возникновении неисправности на основе анализа диагностируемых параметров выявляется причина неисправности. В результате работы защитных устройств и соответственно начала работы второй составляющей в целях определения компонента неисправности запрашивается информация о текущем положении контактов выключателей и реле, работы автоматического повторного включения и вторичного оборудования. После чего осуществляется идентификация компонентов неисправности на основе технологии оптимизации [6]. Затем результаты двух составляющих диагностики комбинируются и выявляется компонент неисправности и причина неисправности. Для более глубокого анализа причины возникшей неисправности применяется вероятностный подход.

Данные методы являются наиболее эффективными, однако, функционируют на основе моделей, представляющих собой т.н.

«черные ящики», что не позволяет выполнить априорную оценку их точности и достоверности работы.

К третьему классу относятся средства диагностики на основе методов решения обратных задач, в основе которых лежат аналитические модели. Данные подходы широко распространены для оценки состояния сложных систем [14]. Для получения максимального эффекта от внедрения на энергетических объектах данного подхода, с одной стороны, возможно использование существующего опыта в данной области, с другой – требуется создание новых и уточнение существующих формализованных математических описаний для расчетно-математических моделей систем мониторинга; уточнение технических требований к оборудованию с учетом их работы совместно с системами мониторинга и диагностики. Одним из наиболее эффективных подходов к мониторингу параметров и диагностике неисправностей сложных технических систем является метод натурно-модельного эксперимента. Схема разработанного алгоритма реализации метода натурно-модельного эксперимента для оценки состояния цифровой подстанции представлена на рисунке.

Алгоритм его реализации состоит из следующих этапов:

1. Выполняется эксперимент, в ходе которого измеряются параметры, характеризующие состояние цифровой подстанции.

2. Строится математическая модель цифровой подстанции, управляющие воздействия, как и в эксперименте.

3. Вычисляются параметры, описывающие состояние подстанции с помощью модели.



Схема алгоритма натурно-модельного метода

4. Результаты расчета сравниваются с полученными экспериментальными: если расхождение превышает требуемое значение, то проводится анализ чувствительности и вводятся новые данные, описывающие состояние подстанции.

5. Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока результаты эксперимента и расчета не совпадут с заданной погрешностью. В этом случае определяемый вид и место повреждения берутся из математической модели цифровой подстанции.

Математическая модель описывает состояние отдельных элементов цифровой подстанции, а также состояние подстанции в целом. Благодаря доступу к большому количеству информации, предоставляемой с датчиков силового оборудования, появляется возможность применения интеллектуального анализа (современные методы обработки сигналов, вейвлет-анализ, методы искусственного интеллекта, машинного обучения) к диагностике оборудования, который позволит оптимально оценивать его состояние, а именно текущее состояние и развивающиеся дефекты на основе анализа величин параметров, характеризующих состояние оборудования, а также отношений системных параметров. Успех реализации этого метода зависит от правильного выбора математической модели цифровой подстанции, погрешности измерения используемых данных, выбор метода минимизации целевого функционала.

Заключение

В результате анализа существующих методов диагностики выявлена проблематика комплексной оценки состояния электроподстанций. В качестве комплексного подхода может быть использован метод натурно-модельного эксперимента, направленный на использование экспериментальных данных для получения адекватной модели объекта. Данное решение, с одной стороны, способствует развитию эффективной диагностики сложных технических систем, с другой – позволяет выявить место и вид неисправности, а также развивающиеся дефекты. Благодаря использованию системного подхода, который предусматривает теоретические, экспериментальные исследования и математическое моделирование, обеспечивается высокая достоверность результатов.

Результаты работы получены при поддержке гранта РФФИ № 16-38-60175 «Разработка и исследование математических моделей, методов и алгоритмов решения обратных задач диагностики сложных технических систем на примере цифровых

подстанций». Работы были выполнены с использованием оборудования ЦКП «Диагностика и энергоэффективное электрооборудование» ЮРГПУ (НПИ).

Список литературы

1. Измерительные оптические трансформаторы тока и напряжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/KPD-5/proline.pdf> (дата обращения: 01.06.2016).
2. Интегрированная инновационная система защиты и управления электрической подстанцией (iSAS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ne-ce.ru/index.php/ru/katalog-produktsii/8-katalog-produktsii/40-obshchee> (дата обращения: 01.06.2016).
3. Отраслевые новости: энергетика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ruscable.ru/news/2016/02/04/Potreblenie_elektroenergii_v_EES_Rossii_v_yanvare/ (дата обращения 01.06.2016).
4. Структура стандарта МЭК 61850 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://digitalsubstation.ru/blog/2012/10/18/struktura-standarta-me-k-61850/> (дата обращения: 01.06.2016).
5. Цифровые подстанции сэкономят энергию [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rg.ru/2013/06/14/stancii.html> (дата обращения: 01.06.2016).
6. Guo W.X., Wen F.S., Liao Z.W., Wei L.H., Xin J.B. An Analytic Model-Based Approach for Power System Alarm Processing Employing Temporal Constraint Network. IEEE Transactions on Power Delivery 25(4), 2435–2447 (2010).
7. H.L. Lee, B.S. Ahn, and Y.M. Park. A fault diagnosis expert system for distribution substations. IEEE Transactions on Power Delivery, Jan. 2000. – vol. 15, № 1. – P. 92–97.
8. Huang Jingbo; Dept. of Electr. Eng., Tongji Univ., Shanghai ; Mu Longhua. Fault Diagnosis of Substation Based on Petri Nets Technology. Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on. Chongqing. – 2006. – P. 1–5.
9. Jung J.W., Liu C.C., Hong M.G., Gallanti M. and G. Tornielli. Multiple hypotheses and their credibility in on-line fault diagnosis. IEEE Transactions on Power Delivery, Apr. 2001. – vol. 16, № 2. – P. 225–230.
10. Jianbo Xin; Jiangxi Provincial Electr. Power Res. Inst., Nanchang, China; Zhiwei Liao; Fushuan Wen. Intelligent alarm processing and fault diagnosis in digital substations // Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on. Hangzhou. – 2010. – P. 1–5.
11. La Cascia D., Di Dio V., Lipari A. Electrical distribution substation remote diagnosis and control system // Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014. 16th International, Antalya, 2014. – P. 1300–1305.
12. Piao Peng, Zhiwei Liao, Fushuan Wen and Jiansheng Huang, A Root-Cause-Analysis Based Method for Fault Diagnosis of Power System Digital Substations. SCI 465, P. 153–165, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013.
13. Shutao Zhao, Xiufang Jia, Baoshu Li, Jinsha Yuan. Remote automatic monitoring and diagnosis status of substation based on computer image processing // Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. 2004 International Conference on (Volume 2). 2004. – P. 1179–1182.
14. Shaykhtudinov D., Shurygin D., Aleksanyan G., Grushko I., Leukhin R., Stetsenko I., Oganyan R., Bondarenko V., Leukhin V. Analysis and Synthesis of Algorithms of Solving Inverse Problems by Methods of Classical and Modern Automatic Control Theory // Asian Journal of Information Technology. – 2016. – № 15(9). – P. 1443–1446.
15. Smart Grid или умные сети электроснабжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eneca.by/ru_smartgrid0/ (дата обращения: 01.06.2016).

16. Zheng Ling; Sch. of Control & Comput. Eng., North China Electr. Power Univ., Beijing, China; Yang Chaoran; Hu Yanxiang. The research of digitized substation fault diagnosis based on 3D GIS // *Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*, 2011 International Conference on. Jilin. 2011. – P. 1374–1377.

References

1. Izmeritelnye opticheskie transformatory toka i nap-
rjazheniya [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/KPD-5/proline.pdf> (data obrashheniya: 01.06.2016).
2. Integrirovannaja innovacionnaja sistema zashhity i
upravleniya jelektricheskoy podstanciej (iSAS) [Elektronnyj
resurs]. Rezhim dostupa: <http://ne-ce.ru/index.php/ru/katalog-produtsii/8-katalog-produtsii/40-obshchee-> (data obrashheniya: 01.06.2016).
3. Otrasyevye novosti: jenergetika [Elektronnyj resurs].
Rezhim dostupa: http://www.ruscable.ru/news/2016/02/04/Potreblenie_elektroenergii_v_EES_Rossii_v_yanvare/ (data obrashheniya: 01.06.2016).
4. Struktura standarta MJeK 61850 [Elektronnyj resurs].
Rezhim dostupa: <http://digitalsubstation.ru/blog/2012/10/18/struktura-standarta-me-k-61850/> (data obrashheniya: 01.06.2016).
5. Cifrovye podstancii sberegut jenergiju [Elektronnyj
resurs]. Rezhim dostupa: <http://rg.ru/2013/06/14/stancii.html> (data obrashheniya: 01.06.2016).
6. Guo W.X., Wen F.S., Liao Z.W., Wei L.H., Xin J.B. An
Analytic Model-Based Approach for Power System Alarm Pro-
cessing Employing Temporal Constraint Network. *IEEE Trans-*
actions on Power Delivery 25(4), 2435–2447 (2010).
7. H.L. Lee, B.S. Ahn, and Y.M. Park. A fault diagnosis ex-
pert system for distribution substations. *IEEE Transactions on*
Power Delivery, Jan. 2000. vol. 15, no. 1. pp. 92–97.
8. Huang Jingbo; Dept. of Electr. Eng., Tongji Univ.,
Shanghai ; Mu Longhua. Fault Diagnosis of Substation Based
on Petri Nets Technology. *Power System Technology*, 2006.
PowerCon 2006. International Conference on. Chongqing. 2006.
pp. 1–5.
9. Jung J.W., Liu C.C., Hong M.G., Gallanti M. and
G. Tornielli. Multiple hypotheses and their credibility in on-
line fault diagnosis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Apr.
2001. vol. 16, no. 2. pp. 225–230.
10. Jianbo Xin; Jiangxi Provincial Electr. Power Res. Inst.,
Nanchang, China; Zhiwei Liao; Fushuan Wen. Intelligent alarm
processing and fault diagnosis in digital substations // *Power*
System Technology (POWERCON), 2010 International Confer-
ence on. Hangzhou. 2010. pp. 1–5.
11. La Cascia D., Di Dio V., Lipari A. Electrical distribution
substation remote diagnosis and control system // *Power Elec-*
tronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC),
2014. 16th International, Antalya, 2014. pp. 1300–1305.
12. Piao Peng, Zhiwei Liao, Fushuan Wen and Jiansheng
Huang, A Root-Cause-Analysis Based Method for Fault Diagno-
sis of Power System Digital Substations. *SCI* 465, pp. 153–165,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2013.
13. Shutao Zhao, Xiufang Jia, Baoshu Li, Jinsha Yuan. Re-
mote automatic monitoring and diagnosis status of substation
based on computer image processing // *Power System Technol-*
ogy, 2004. *PowerCon 2004. 2004 International Conference on*
(Volume 2). 2004. pp. 1179–1182.
14. Shaykhutdinov D., Shurygin D., Aleksanyan G., Grushko I.,
Leukhin R., Stetsenko I., Oganyan R., Bondarenko V., Leukhin V.
Analysis and Synthesis of Algorithms of Solving Inverse Problems by
Methods of Classical and Modern Automatic Control Theory // *Asian*
Journal of Information Technology. 2016. no. 15(9). pp. 1443–1446.
15. Smart Grid ili umnye seti jelektronnabzheniya [Elek-
tronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://www.eneca.by/ru_smart-grid0/ (data obrashheniya: 01.06.2016).
16. Zheng Ling; Sch. of Control & Comput. Eng., North
China Electr. Power Univ., Beijing, China; Yang Chaoran; Hu
Yanxiang. The research of digitized substation fault diagnosis
based on 3D GIS // *Mechatronic Science, Electric Engineering*
and Computer (MEC), 2011 International Conference on. Jilin.
2011. pp. 1374–1377.