

УДК 621.314.222.6
Л363

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор *В. З. Манусов*
д-р техн. наук, профессор *С. В. Горелов*
д-р физ.-мат. наук, профессор *С. М. Коробейников*

Левин В. М.

Л363 Предиктивная аналитика и оценка технического состояния трансформаторного оборудования энергетических объектов: монография / В. М. Левин, А. А. Яхья. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. – 170 с. – (Монографии НГТУ).

ISBN 978-5-7782-5054-3

Работа посвящена системам диагностического мониторинга и управления техническим состоянием силового трансформаторного оборудования ответственных энергетических объектов (электростанций и электрических сетей). Особое внимание уделяется методам и моделям предиктивной аналитики, позволяющим обеспечивать надежное функционирование трансформаторов, как критически важного актива ЭЭС, на основе достоверного распознавания и своевременного устранения опасных развивающихся дефектов. Предложены оригинальные решения и программное обеспечение, согласующие функциональные возможности современных технических средств мониторинга с повышенными требованиями к достоверности диагностической оценки состояния оборудования. Работа обладает теоретической и практической значимостью, что определяет ее полезность для широкого круга читателей, интересующихся эксплуатацией силовых трансформаторов.

УДК 621.314.222.6

DOI 10.17212/978-5-7782-5054-3
ISBN 978-5-7782-5054-3

© Левин В. М., Яхья А. А., 2023
© Новосибирский государственный
технический университет, 2023

УДК 621.314.222.6
Л363

Reviewers:

Professor V. Z. Manusov, D. Sc.(Eng.)
Professor S. V. Gorelov, D. Sc.(Eng.)
Professor S. M. Korobeinikov, D. Sc.(Phys.&Math.)

Levin V. M.

Л363 Predictive analytics and assessment of the technical condition of transformer equipment of energy facilities: monograph / V. M. Levin, A. A. Yakh'ya. – Novosibirsk: NSTU Publisher, 2023. – 170 p. – (NSTU Monographs).

ISBN 978-5-7782-5054-3

The work is devoted to systems for diagnostic monitoring and control of the technical condition of power transformer equipment of critical energy facilities (power plants and electrical networks). Particular attention is paid to the methods and models of predictive analytics, which make it possible to ensure the reliable operation of transformers, as a critical asset of the EPS, based on reliable recognition and timely elimination of dangerous developing defects. Original solutions and software are proposed that harmonize the functionality of modern technical monitoring tools with increased requirements for the reliability of diagnostic assessment of equipment condition. The work is of theoretical and practical significance, which determines its usefulness for a wide range of readers interested in the operation of power transformers.

УДК 621.314.222.6

DOI 10.17212/978-5-7782-5054-3
ISBN 978-5-7782-5054-3

© Levin V. M., Yakh'ya A. A., 2023
© Novosibirsk State Technical University, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список принятых сокращений.....	7
Введение	8
Глава 1. Методы и модели для оценки технического состояния и остаточного ресурса электрооборудования.....	9
§ 1.1. Характеристика свойств предиктивности в задачах моделирования для оценки технического состояния оборудования.....	9
§ 1.2. Силовые трансформаторы как критический тип активов энергопредприятий	16
§ 1.3. Информационное обеспечение в задачах оперативной и предиктивной оценки технического состояния и остаточного ресурса силовых трансформаторов.....	20
§ 1.4. Оценка эффективности методов мониторинга параметров технического состояния трансформаторного оборудования	25
1.4.1. Моделирование вероятности отказа силового маслонаполненного трансформатора с учетом его технического состояния.....	27
1.4.2. Критерий оценки информативности диагностического мониторинга силовых маслонаполненных трансформаторов с применением анализа растворенных газов	30
1.4.3. Оценка экономического эффекта от применения мониторинга силовых маслонаполненных трансформаторов на основе анализа растворенных газов	32
Выводы.....	35
Глава 2. Математический аппарат для разработки предиктивных и адаптивных моделей оценки состояния трансформаторов	37
§ 2.1. Модели и алгоритмы предиктивной диагностики и оценки технического состояния трансформаторов с применением методов машинного обучения	37

§ 2.2. Разработка нечетких предиктивных моделей интерпретации результатов анализа растворенных газов трансформаторов в программной среде проектирования	41
§ 2.3. Верификация разработанных нечетких предиктивных моделей интерпретации типа дефектов в силовых трансформаторах.....	60
Выводы.....	64
Глава 3. Базовые модели управления состоянием трансформаторов на основе метода статистической классификации и распознавания образов	65
§ 3.1. Модели статистической классификации дефектов в силовых маслонаполненных трансформаторах и их интеграция с оценкой остаточного эксплуатационного ресурса	65
§ 3.2. Исследование достоверности разработанных статистических моделей для оперативной оценки технического состояния трансформаторов	82
Выводы.....	90
Глава 4. Информационно-аналитическая поддержка принятия решений по эксплуатации трансформаторного оборудования энергообъектов	91
§ 4.1. Базовая структура и функции информационно-аналитической поддержки принятия решений по эксплуатации трансформаторов в составе типового энергообъекта	91
§ 4.2. Информационно-аналитическая поддержка принятия решений по эксплуатации трансформаторов 110 кВ распределительной электрической сети с функцией удаленного мониторинга	96
§ 4.3. Информационно-аналитическая система поддержки принятия решений по эксплуатации блочных трансформаторов 110 кВ гидроэлектростанции	102
Выводы.....	111
Глава 5. Прикладное программное обеспечение для управления эксплуатацией трансформаторов ответственных энергообъектов	113
§ 5.1. Прикладное программное обеспечение (Software) в области диагностики и оценки состояния силовых трансформаторов как одно из самостоятельных направление научных исследований и разработок	113

§ 5.2. Характеристика функций и структура разработанного прикладного программного обеспечения	115
§ 5.3. Результаты верификации моделей и тестирования прикладного программного обеспечения	140
Выводы.....	148
Заключение	150
Библиографический список	153

CONTENTS

List of abbreviations.....	7
Introduction.....	8
Chapter 1. Methods and models for assessing technical condition and residual service life of electrical equipment.....	9
§ 1.1. Characteristics of predictive properties in modeling problems to assess the equipment technical.....	9
§ 1.2. Power transformers as a critical asset type of energy.....	16
§ 1.3. Information support in operational and predictive tasks of assessment of the technical condition and residual service life of power transformers.....	20
§ 1.4. Assessment of the effectiveness of methods of parameter monitoring of technical condition of transformer equipment.....	25
1.4.1. Modeling the probability of power oil-filled transformer failure taking into account its technical condition.....	27
1.4.2. A criterion for assessing the information content of diagnostic monitoring of power oil-filled transformers using the dissolved gas analysis.....	30
1.4.3. Assessment of the economic effect of monitoring power oil-filled transformers based on the dissolved gas analysis.....	32
Conclusions.....	35
Chapter 2. Mathematical apparatus for developing predictive and adaptive models for assessing the condition of transformers.....	37
§ 2.1. Models and algorithms for predictive diagnostics and assessment of the technical condition of transformers using machine learning methods.....	37
§ 2.2. Development of fuzzy predictive models for interpreting the results of the analysis of transformer dissolved gases of in a software environment.....	41
§ 2.3. Verification of the developed fuzzy predictive models for the interpretation of the type of defects in power transformers.....	60
Conclusions.....	64
Chapter 3. Basic models of transformer condition management based on the statistical classification method and pattern recognition.....	65
§ 3.1. Statistical defect classification models in power oil-filled transformers and their integration with an estimated residual service life.....	65

§ 3.2. Research into the reliability of the developed statistical models for prompt assessment of the technical condition of transformers	82
Conclusions	90
Chapter 4. Information and analytical support for decision making on the operation of transformer equipment of energy facilities	91
§ 4.1. Basic structure and functions of information and analytical support for making decisions on the operation of transformers as part of a standard power facility	91
§ 4.2. Information and analytical support for decision making on the operation of 110 kV transformers in the distribution electrical network with a remote monitoring function	96
§ 4.3. Information and analytical decision support system on the operation of 110 kV block transformers at hydroelectric power stations	102
Conclusions	111
Chapter 5. Application software for managing the operation of transformers at critical power facilities	113
§ 5.1. Application software in the field of diagnostics and assessment of the condition of power transformers as one of independent areas of research and development	113
§ 5.2. Characteristics of functions and structure of the developed application software	115
§ 5.3. Results of model verification and testing application software	140
Conclusions	148
Conclusive statement	150
References	153