

УДК 621.311:004.8

П 764

Рецензенты:

*А.Г. Овсянников*, д-р техн. наук, профессор

*С.В. Горелов*, д-р техн. наук, профессор

**П 764    Применение методов искусственного интеллекта в задачах технической диагностики электрооборудования электрических систем** : монография / В.З. Манусов, В.М. Левин, А.И. Хальясмаа, Дж.С. Ахьёев; под общ. ред. В.З. Манусова. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. – 446 с. – (Монографии НГТУ).

ISBN 978-5-7782-4203-6

Рассмотрены возможности применения методов искусственного интеллекта, вероятностно-статистических методов и экспертных оценок для технической диагностики электрооборудования электроэнергетических систем с учетом их текущего технического состояния, а также управление жизненным циклом и их остаточным эксплуатационным ресурсом.

Монография представляет собой глубоко обобщающий труд, имеющий теоретическую и практическую значимость, и будет полезна для широкого круга научных работников, аспирантов, магистрантов и инженеров-электриков, работающих в области эксплуатации электросетевого оборудования электроэнергетических систем.

**УДК 621.311:004.8**

**ISBN 978-5-7782-4203-6**

© Манусов В.З., Левин В.М.,  
Хальясмаа А.И., Ахьёев Дж.С., 2020

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| Предисловие .....   | 7         |
| Список сокращений .....   | 8         |
| Введение .....  | 9         |
| <b>Глава 1. Методы технической диагностики электросетевого<br/>оборудования и пути их развития .....</b>  | <b>11</b> |
| 1.1. Совершенствование планово-предупредительных ремонтов<br>и ремонтов по техническому состоянию электрооборудования<br>на основе теории нечетких множеств ..... | 11        |
| 1.2. Основные понятия и термины надежности и диагностики .....  | 19        |
| 1.3. Основные понятия о системах диагностирования<br>электрооборудования .....  | 27        |
| Выводы .....  | 35        |
| <b>Глава 2. Основные положения нечеткой логики и нечетких<br/>отношений, применяемые в технике .....</b>  | <b>37</b> |
| 2.1. Краткий исторический экскурс .....   | 37        |
| 2.2. Нечеткие системы .....   | 38        |
| 2.3. Основы теории нечетких множеств .....  | 41        |
| 2.4. Математическое представление нечетких множеств .....   | 45        |
| 2.5. Нечеткие рассуждения .....   | 46        |
| 2.6. Нечеткие правила .....   | 48        |
| 2.7. Системы нечеткого логического вывода .....   | 53        |
| Выводы .....  | 58        |
| <b>Глава 3. Нечеткие модели для диагностики силовых<br/>трансформаторов .....</b>   | <b>59</b> |
| 3.1. Сущность диагностических систем .....  | 59        |
| 3.2. Нечеткая логика: новая концепция для технической<br>диагностики неисправностей электрооборудования .....   | 61        |



|   |    |
|---|----|
| 3.3. Нечеткие отношения: основные понятия, определения<br>и операции над ними .....                                   | 68 |
| 3.4. Признаки неисправности и дефекты силовых трансформаторов<br>при эксплуатации .....                               | 77 |
| 3.5. Диагностическая модель текущего технического состояния<br>электрооборудования на основе нечетких отношений ..... | 85 |
| 3.6. Углубленная нечеткая модель технической диагностики<br>трансформатора .....                                      | 93 |
| Выводы .....  | 99 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Глава 4. Управление жизненным циклом электросетевого<br/>оборудования .....</b>  | <b>101</b> |
| 4.1. Управление жизненным циклом электросетевого оборудования .....   | 101        |
| 4.1.1. Математические подходы к управлению жизненным<br>циклом оборудования .....   | 108        |
| 4.1.2. Управление жизненным циклом высоковольтного<br>оборудования .....  | 131        |
| 4.1.3. Планово-предупредительные ремонты .....  | 146        |
| 4.1.4. Автоматизированные системы управления жизненным<br>циклом оборудования .....   | 155        |
| 4.2. Анализ нормативно-правового и нормативно-технического<br>обеспечения функционирования систем управления и прогно-<br>зирования жизненного цикла электрооборудования в России ..... | 168        |
| 4.3. Анализ современных автоматизационных систем оценки<br>функционального состояния оборудования .....   | 178        |
| 4.3.1. Методы технической диагностики и испытаний .....   | 178        |
| 4.3.2. Системы технического диагностирования и мониторинга .....  | 190        |
| Выводы .....  | 204        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Глава 5. Диагностические модели и оценка технического состояния<br/>электрооборудования на основе статистической байесов-<br/>ской идентификации .....</b> | <b>205</b> |
| 5.1. Теоретические основы статистической идентификации<br>состояния электрооборудования .....   | 205        |
| 5.1.1. Идентификация технического состояния и надежности<br>оборудования при управлении эксплуатацией<br>энергообъектов .....                                 | 205        |
| 5.1.2. Методы преобразования и обработки информации при<br>идентификации технического состояния оборудования .....  | 207        |



|  |            |
|--|------------|
| 5.2. Метод и критерии статистической идентификации состояний с применением хроматографического анализа .....                           | 215        |
| 5.2.1. Формирование границы раздела классов состояний СТ в пространстве диагностических признаков .....                                | 216        |
| 5.2.2. Адаптация границы раздела классов состояний к изменениям эксплуатационных факторов.....   | 232        |
| 5.2.3. Статистическая идентификация критических дефектов в СТ по результатам ХАРГ .....  | 238        |
| 5.3. Модели экспресс-оценки технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов .....                                      | 245        |
| 5.4. Алгоритмы оперативного управления эксплуатационным состоянием трансформаторов.....  | 252        |
| 5.5. Информационно-аналитическая поддержка принятия решений для обеспечения надежной эксплуатации трансформаторного оборудования ..... | 254        |
| Выводы.....  | 263        |
| <b>Глава 6. Статистические методы обучения в задачах мониторинга и диагностики электрооборудования .....</b>                           | <b>265</b> |
| 6.1. Методы обучения на основе байесовских преобразований.....   | 265        |
| 6.1.1. Стохастическая сущность и диагностическая ценность исходных измерений .....   | 265        |
| 6.1.2. Методы статистической классификации и байесовских преобразований .....  | 268        |
| 6.2. Методы обучения на основе искусственных нейронных сетей .....   | 280        |
| 6.2.1. Обучение искусственных нейронных сетей для синтеза моделей статистической идентификации.....                                    | 280        |
| 6.2.2. Реализация моделей ИНС для идентификации дефектов в силовых трансформаторах активно-адаптивной электрической сети .....         | 285        |
| Выводы.....  | 293        |
| <b>Глава 7. Метод экспертных оценок .....</b>  | <b>295</b> |
| 7.1. Метод экспертных оценок .....   | 295        |
| 7.2. Основная идея метода и стадии опроса.....   | 297        |
| Выводы.....  | 299        |
| <b>Глава 8. Экспертные оценки на основе средних арифметических.....</b>  | <b>301</b> |



|   |            |
|---|------------|
| 8.1. Метод средних арифметических.....  | 301        |
| 8.2. Оценка согласованности шести экспертных мнений.....  | 303        |
| 8.3. Оценка согласованности шести экспертных мнений при значи-<br>тельных отклонениях мнений экспертов.....   | 314        |
| 8.4. Оценка согласованности девяти экспертных мнений.....   | 321        |
| 8.5. Оценка согласованности девяти экспертных мнений при значи-<br>тельных отклонениях мнений экспертов.....  | 325        |
| Выводы.....   | 330        |
| <b>Глава 9. Экспертные оценки на основе медианы Кемени .....</b>  | <b>331</b> |
| 9.1. Метод медианы Кемени.....  | 331        |
| 9.2. Оценка согласованности шести экспертных мнений.....  | 334        |
| 9.3. Оценка согласованности шести экспертных мнений при значи-<br>тельных отклонениях мнений экспертов.....   | 338        |
| 9.4. Оценка согласованности девяти экспертных мнений.....   | 343        |
| 9.5. Оценка согласованности девяти экспертных мнений при значи-<br>тельных отклонениях мнений экспертов.....  | 346        |
| Выводы.....   | 352        |
| <b>Глава 10. Метод анализа иерархий.....</b>  | <b>353</b> |
| 10.1. Описание метода .....   | 353        |
| 10.2. Области применения метода анализа иерархий в мире .....   | 363        |
| 10.3. Применение метода анализа иерархий в электроэнергетике .....  | 367        |
| 10.4. Принятие решений на основе метода иерархий .....  | 370        |
| Выводы.....   | 371        |
| <b>Глава 11. Метод анализа иерархий для технической диагностики<br/>трансформаторов: сухих, маслонаполненных<br/>и с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой .....</b> | <b>373</b> |
| 11.1. Математическая модель для сухих трансформаторов .....   | 373        |
| 11.2. Пятый уровень иерархии .....  | 374        |
| 11.3. Четвертый уровень иерархии .....  | 376        |
| 11.4. Третий уровень иерархии .....   | 379        |
| 11.5. Второй уровень иерархии .....   | 381        |
| 11.6. Оценка результатов .....  | 382        |
| 11.7. Математическая модель для маслонаполненных трансфор-<br>маторов.....  | 384        |
| 11.8. Пятый уровень иерархии .....  | 386        |
| 11.9. Четвертый уровень иерархии .....  | 390        |



|   |     |
|---|-----|
| 11.10. Третий уровень иерархии .....  | 392 |
| 11.11. Второй уровень иерархии .....  | 393 |
| 11.12. Оценка результатов .....   | 394 |
| 11.13. Математическая модель для трансформаторов с высокотемпературной сверхпроводящей обмоткой ..... | 395 |
| 11.14. Пятый уровень иерархии .....   | 397 |
| 11.15. Четвертый уровень иерархии .....   | 399 |
| 11.16. Третий уровень иерархии .....  | 401 |
| 11.17. Второй уровень иерархии .....  | 404 |
| 11.18. Оценка результатов .....   | 404 |
| Заключение .....  | 407 |
| Библиографический список .....  | 409 |
| Приложение .....  | 433 |
| Сведения об авторах .....   | 434 |