

Моделі прогнозування залишкового ресурсу і оцінки ризику пошкоджень електрообладнання електростанцій в умовах нечіткої інформації при збуреннях в електроенергетичній системі (ЕЕС)

Модели прогнозирования остаточного ресурса и оценки риска повреждений электрооборудования электростанций в условиях нечеткой информации при возмущениях в электроэнергетической системе (ЭЭС)

Models of residual life forecasting and estimation of risk of power station equipment failures in the conditions of information illegibility in case of disturbance in the Electric Power System (EPS)

- 1. Номер державної реєстрації теми - 0107U002747, КВНТД 1.213.14.02 УДК 621.311**
- 2. Науковий керівник - д.т.н., проф Костерев М.В., Костерев Н.В., Kosteryev M.V.**
- 3. Суть розробки, основні результати.**

Укр.

Комплексне вирішення задач прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання електростанцій і підсистем ЕЕС та оцінки ризику зниження надійності електропостачання при відмовах електрообладнання відбувається в умовах нечіткості, неповноти інформації та практичною відсутністю математичного опису процесів в електрообладнанні для визначення залишкового ресурсу. Тому для вирішення завдань роботи використані сучасні досягнення в області штучного інтелекту, зокрема експертні системи, центральним елементом яких є база знань та механізм нечіткого логічного висновку.

В роботі запропоновано і обґрунтовано методи і моделі для формування бази знань експертної системи підтримки прийняття рішень по забезпеченню надійності електропостачання споживачів. В якості інтегрального показника запропоновано використання ризику порушення електропостачання, який враховує імовірність відмови електрообладнання, імовірність виникнення аварійної ситуації за одним із сценаріїв, а також збитки економічного, матеріального та соціального характеру.

В умовах обмеженої кількості доступної інформації та відсутності математичного опису процесів в електрообладнанні вирішення задачі здійснюється на основі нечітких моделей електрообладнання (вимикача та трансформатора). В якості вхідних лінгвістичних змінних нечіткої моделі вимикача прийнято механічний та комутаційний ресурс, в якості вихідної змінної – суб'єктивна імовірність відмови вимикача (або спрацьований ресурс). З метою підвищення достовірності оцінок результатів по нечіткій моделі вимикача була виконана параметрична ідентифікація параметрів функцій приналежності з використанням експериментальної вибірки. Порівняння результатів розрахунку імовірності відмови вимикача за нечіткою моделлю і реальної технологічної відмови показало високу ступінь збіжності, що підтверджує адекватність нечіткої моделі вимикача.

Розроблена нечітка модель післяремонтного стану вимикача, яка дозволяє визначити відновлення спрацьованого ресурсу після ремонту.

Для прогнозування залишкового ресурсу електрообладнання запропонований нечіткий регресійний аналіз, при якому розвиток змінювання ресурсу у часі представлено у вигляді нечіткого часового ряду, який представляє собою деяку впорядковану послідовність спостережень над змінюванням у часі ресурсу, при умові, що функція приналежності залишається незмінною. Відповідно до цього підходу нечіткі коефіцієнти регресійної моделі визначаються таким чином, що оцінений нечіткий вихід має мінімальний нечіткий розкид, який задовольняє заданому ступеню вірогідності, яка задається як міра суміжності між вихідними даними та моделлю регресії. Для

підтвердження адекватності розроблених нечітких регресійних моделей прогнозування залишкового ресурсу силового трансформатора на прикладі ТДН – 10000/110 Канівської ГЕС були виконані розрахунки залишкового ресурсу за параметрами, що визначаються ФХАМ, які показали, що термін вичерпання ресурсу масляної ізоляції силового трансформатора становить 4,2 роки і визначається за динамікою змінення тангенса кута діелектричних втрат масла.

Для оцінки ризику експлуатації електрообладнання системи власних потреб електростанцій розроблена нечітка модель та деревовидні ієрархічні структури схеми факторів ризику, за допомогою яких можна визначити технічну і економічну складову ризику на кожному рівні ієрархії, а також інтегральний ризик експлуатації електрообладнання підсистем ЕЕС при агрегуванні впливів окремих груп параметрів, при по вузловому агрегуванні в умовах якісного і кількісного представлення параметрів.

Запропонований підхід для оцінки імовірності виникнення КЗ і відмов електрообладнання на заданому інтервалі часу, який використовує функцію розподілу імовірності відмови електрообладнання на базі статистичних даних генеральної сукупності відмов даного типу обладнання з уточненням індивідуальних характеристик конкретної одиниці обладнання до моменту спостереження.

Достовірність отриманих результатів підтверджується порівнянням оцінки технічного стану вимикачів та трансформаторів, що проводились з використанням нечітких моделей, з реальними експлуатаційними даними на Канівській ГЕС, Дніпровській ГЕС, а також розрахунками для вузла навантаження крупного промислового підприємства.

Рос.

Комплексное решение задач прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования электростанций и подсистем ЭЭС и оценки риска снижения надежности электроснабжения при отказах электрооборудования происходит в условиях нечеткости, неполноты информации и практических отсутствием математического описания процессов в электрооборудовании для определения остаточного ресурса. Поэтому для решения задач работы использованы современные достижения в области искусственного интеллекта, в частности экспертные системы, центральным элементом которых является база знаний и механизм нечеткого логического вывода.

В работе предложены и обоснованы методы и модели для формирования базы знаний экспертной системы поддержки принятия решений по обеспечению надежности электроснабжения потребителей. В качестве интегрального показателя предложено использование риска нарушения электроснабжения, учитывающего вероятность отказа электрооборудования, вероятность возникновения аварийной ситуации по одному из сценариев, а также убытки экономического, материального и социального характера. В условиях ограниченного количества доступной информации и отсутствия математического описания процессов в электрооборудовании решение задачи осуществляется на основе нечетких моделей электрооборудования (выключателя и трансформатора). В качестве входных лингвистических переменных нечеткой модели выключателя принято механический и коммутационный ресурс, а в качестве выходной переменной - субъективная вероятность отказа выключателя (или сработанный ресурс). С целью повышения достоверности оценок результатов по нечеткой модели выключателя была выполнена параметрическая идентификация параметров функций принадлежности с использованием экспериментальной выборки. Сравнение результатов расчета вероятности отказа выключателя по нечеткой модели и реального технологического отказа показало высокую степень совпадения, подтверждающего адекватность нечеткой модели выключателя.

Разработана нечеткая модель послеремонтного состояния выключателя, которая позволяет определить восстановление изношенного ресурса после ремонта.

Для прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования предложен нечеткий регрессионный анализ, при котором развитие изменения ресурса во времени представлено в виде нечеткого временного ряда, который представляет собой некоторую упорядоченную последовательность наблюдений над изменением во времени ресурса, при условии, что функция принадлежности остается неизменной. Согласно этому подходу нечеткие коэффициенты регрессионной модели определяются таким образом, что оцененный нечеткий выход имеет минимальный нечеткий разброс, который удовлетворяет заданной степени достоверности, которая задается как мера совместимости между исходными данными и моделью регрессии. Для подтверждения адекватности разработанных нечетких регрессионных моделей прогнозирования остаточного ресурса силового трансформатора на примере ТДН - 10000/110 Каневской ГЭС были выполнены расчеты остаточного ресурса по параметрам, которые определяются ФХАМ, которые показали, что срок истощения ресурса масляной изоляции силового трансформатора составляет 4,2 года и определяется по динамике изменения тангенса угла диэлектрических потерь масла.

Для оценки риска эксплуатации электрооборудования системы собственных нужд электростанций разработана нечеткая модель и древовидные иерархические структурные схемы факторов риска, с помощью которых можно определить техническую и экономическую составляющую риска на каждом уровне иерархии, а также интегральный риск эксплуатации электрооборудования подсистем ЭЭС при агрегировании влияний отдельных групп параметров, и при поузловом агрегировании в условиях качественного и количественного представления параметров.

Предложенный подход для оценки вероятности возникновения КЗ и отказов электрооборудования на заданном интервале времени, который использует функцию распределения вероятности отказа электрооборудования на базе статистических данных генеральной совокупности отказов данного типа оборудования с уточнением индивидуальных характеристик конкретной единицы оборудования до момента наблюдения.

Достоверность полученных результатов подтверждается сравнением оценки технического состояния выключателей и трансформаторов, которые проводились с использованием нечетких моделей, с реальными эксплуатационными данными на Каневской ГЭС, Днепровской ГЭС, а также расчетами для узла нагрузки крупного промышленного предприятия.

Англ.

The complex solving of problems of forecasting of residual life of EPS power stations and subsystems electrical equipment and estimation of risk of power supply reliability decreasing in case of electrical equipment failures is in the conditions of an illegibility, incompleteness of the information and practical absence of the mathematical description of the electric equipment processes with the aim of determining the residual life. Therefore for problem solving of study modern achievements in the field of an artificial intellect, in particular the expert systems, which central element is the knowledge base and the mechanism of an indistinct logic conclusion, were used.

In this study the formation methods and models of knowledge base of expert system of decision-making support on maintenance of consumer power supply reliability are offered and proven. As an integrated indicator the use of risk of infringement of the power supply considering probability of refusal of electric equipment, probability of occurrence of an emergency on one of scenarios, and also losses of economic, material and social character is offered.

In the conditions of the limited amount of the accessible information and absence of the mathematical description of processes in electric equipment the problem decision is carried out on the basis of indistinct models of electric equipment (the switch and the transformer). As

entrance linguistic variables of indistinct model of the switch it is accepted a mechanical and switching resource, and as a target variable - subjective probability of refusal of the switch (or the worked resource). For the purpose of increase of reliability of estimations of results on indistinct model of the switch parametrical identification of parameters of functions of an accessory with use of experimental sample has been executed. Comparison of results of calculation of probability of refusal of the switch on indistinct model and real technological refusal has shown high degree of the coincidence confirming adequacy of indistinct model of the switch.

The indistinct model of the post-maintenance conditions of the switch, that allows defining the restoration of the worn out resource after maintenance is developed.

For forecasting of a residual life of electric equipment it is offered the indistinct regression analysis whereby the time changing process of residual life is presented as an indistinct time series which is an ordered sequence of observations over residual life time changing provided that accessory function remains invariable. According to this approach indistinct factors regression models are defined in such a manner that the estimated indistinct output has the minimum indistinct disorder which satisfies the set degree of reliability which is set as a compatibility measure between initial data and regress model. For acknowledgement of adequacy of the developed indistinct regression models of forecasting of a residual life of the power transformer, for instance "ТДН - 10000/110" at Kanivska HYDROELECTRIC POWER STATION there were calculated the residual life with the use of parameters which are defined by the PHYSICAL AND CHEMICAL OIL ANALYSIS, that have shown, that term of exhaustion of a resource of oil isolation of the power transformer makes 4,2 years and is defined on dynamics of change of a tangent of a corner of dielectric losses of oil.

The indistinct model and treelike hierarchical block diagrams of risk factors with which help it is possible to define a technical and economic component of risk at each level of hierarchy, and also is developed for an estimation of risk of operation of an electric equipment of system of own needs of power stations integrated risk of operation of an electric equipment of EPS subsystems at aggregation of influences of separate groups of parameters, and at unit-by-unit aggregations in the conditions of qualitative and quantitative representation of parameters.

The offered approach for the estimation of probability of occurrence short-circuit failures and electrical equipment failures in the set interval of time with the use of probability-distribution function of electrical equipment failures on the basis of statistical data of a general failures population of the defined type of equipment with specification of individual characteristics of a concrete equipment unit to the supervision moment.

The obtained results reliability has been proven by comparison of estimation of the technical state of switches and transformers which was conducted with the use of unclear models, with the real operating information on Kanivska HYDROELECTRIC POWER STATION, Dniprovka HYDROELECTRIC POWER STATION, and also by calculations for the knot of loading of major industrial enterprise.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності

За результатами роботи отримано патент.

5. Порівняння зі світовими аналогами

Результати відповідають світовому рівню. Отримані результати в цілому, дозволять впроваджувати ресурсозберігаючі технології в енергетику України, що дозволить покращити якість електроенергії, зекономити енергоресурси та сировину, а також зменшити знос обладнання.

6. Економічна привабливість для просування на ринок

7. Потенційні користувачі

Результати роботи можуть бути впроваджені на електростанціях України, енергозбутових компаніях, в системах енергопостачання крупних промислових підприємств.

8. Стан готовності розробки.

Розроблені методи, моделі і програмне забезпечення для формування бази знань експертної системи підтримки прийняття рішень по забезпеченню надійності електропостачання споживачів.

9. Існуючі результати впровадження

Основні результати роботи впроваджено на Дніпровській ГЕС, а також в навчальному посібнику "Електрична частина електричних станцій. Силові трансформатори" та використовуються в дисциплінах "Експлуатація і режими роботи електростанцій", "Методи і засоби діагностування електрообладнання АЕС і ТЕС" і в курсі "Експертні системи в енергетиці".

10. Назва підрозділу, телефон, e-mail

НТУУ "КПІ", факультет електроенергетики та автоматики, кафедра електричних станцій, 406-82-33, kafedra_et@fea.kpi.ua

11. Перелік публікацій за матеріалами дослідження за період виконання:

1. Костерев М. В., Бардик Є. І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. – К.: НТУУ "КПІ", 2010. – 131 с. (монографія).
2. Литвинов В. В., Костерев М. В., Денисюк П. Л. Модель фаззи-контроллера для забезпечення статической устойчивости промышленного узла загрузки энергосистемы // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : «Електротехніка і енергетика», випуск 8 (140). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – С. 51-51.
3. В. В. Литвинов, Н. В. Костерев, П. Л. Денисюк. Исследование статической устойчивости промышленного узла нагрузки с помощью нечетких моделей // Энергетика: економіка, технологія, екологія, 2009, №1. – С.57-64.
4. Н. В. Костерев, П. Л. Денисюк, В. В. Литвинов. Определение приоритетности способов повышения статической устойчивости узла нагрузки с асинхронными двигателями в условиях многокритериального выбора // Технічна електродинаміка, 2009, №5. – С.31-36.
5. Спосіб регулювання напруги електричної споживчої підстанції: Пат. 45781 Україна, МПК (2009) H 02 J 3/12. Костерев М. В., Денисюк П.Л., Литвінов В. В. (Україна); НТУУ «КПІ». – № u200906078; Заявл. 12.06.2009; Опубл. 25.11.2009.
6. Костерев Н. В., Литвинов В. В., Ярощук А. Оценка технического состояния высоковольтных выключателей с помощью нечеткой модели // Збірник доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». Том 1. – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – С. 108-112.
7. В. В. Литвинов, Н. В. Костерев, П. Л. Денисюк. Влияние метода определения весовых коэффициентов важности оптимизационных критериев на оценку приоритетности способов обеспечения статической устойчивости асинхронных двигателей. // Научно-практический вестник «Энергия – XXI век», 2010, №1. – С. 39-45.
8. Літвінов В. В., Костерев М. В., Денисюк П.Л. Використання методів попарного порівняння для визначення пріоритетності способів забезпечення статичної

- стійкості асинхронних двигунів в умовах багатокритеріального вибору // Наукові вісті НТУУ «КПІ», 2010, №2. – С. 24-29.
9. Литвинов В. В. Построение модели исследования статической устойчивости узла нагрузки энергосистемы с помощью метода парных сравнений // Технічна електродинаміка, 2010, тематичний випуск, частина 2. – С. 91-95.
 10. Бардик Є. І., Алексеєнко Е. В. Нечіткі моделі діагностування технічного стану і регулювання напруги пристроїв регулювання напруги під навантаженням силових трансформаторів // Збірник доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». Том 1. – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – С. 15-22.
 11. Бардик Є. І., Костерев М. В., Федосов І.С. Нечіткі моделі оцінки після ремонтного технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу високовольтних вимикачів // Технічна електродинаміка. тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". 2010. Частина 3. Київ, 2006, стор 53-59
 12. Костерев Н. В., Бардик Е. И., Диагностирование технического состояния и прогнозирование остаточного ресурса силового электрооборудования электроэнергетических систем на основе нечеткой информации // Технічна електроніка. тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". К.- Інститут електродинаміки НАНУ, 2008.-ч.7 с.11-17
 13. Костерев Н. В., Бардик Е. И., Нечеткие алгоритмы оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрообладнання. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Електротехніка і енергетика", випуск 8(140). Донецьк, 2008. с.65-71
 14. Бардик Є. І., Болотний М. П. Діагностування технічного стану силових трансформаторів на основі результатів вимірювання опору короткого замикання // Збірник доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». Том 1. – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – С. 22-26.
 15. Бардик Є. І., Гаєвська Г. М., Клим Т. З. Моделювання асинхронного двигуна для визначення технічного стану і залишкового ресурсу // Збірник доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». Том 1. – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – С. 26-34.
 16. Бардик Є. І., Федосов І. С., Болотний М. П. Оцінка ризику експлуатації електрообладнання на основі агрегування факторів ризику // Збірник доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». Том 1. – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – С. 34-38.
 17. Бардик Є. І., Ніколаєв О. А., Гладкий Є. М. Прогнозування змінювання технічного стану і залишкового ресурсу електрообладнання // Збірник доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». Том 1. – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – С. 38-43.
 18. Бардик Є. І., Сердюк О. А. Визначення ресурсу високовольтних вимикачів в залежності від якості і кількості ремонтів // Збірник доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». Том 1. – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – С. 43-45.
 19. Бардик Є. І., Федосов І. С. Лінгвістичне моделювання ризику експлуатації електрообладнання за наявності дефекту // Збірник доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». Том 1. – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – С. 45-49.
 20. Бардик Є. І., Федосов І. С. Нечіткі моделі оцінки післяремонтного технічного стану високовольтних вимикачів // Збірник доповідей міжнародної науково-технічної

- конференції «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». Том 1. – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – С. 49-56.
21. Бардик Є. І., Вожаков Р. В., Гладкий Є. М. Діагностування технічного стану силового трансформатора за результатами фізико-хімічного аналізу масла з використанням нечітких множин // Збірник доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». Том 1. – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – С. 56-61.
 22. Бардик Є. І., Вожаков Р. В. Прогнозування залишкового ресурсу високовольтних вимикачів на основі нечітких часових рядів // Збірник доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». Том 1. – Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – С. 61-69.
 23. Бардик Є. І., Федосов І. С., Болотний М. П. Розробка математичного і програмного забезпечення прототипу експертної системи оцінки ризику експлуатації систем електропостачання. Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів: «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», НТУУ «КПІ», Київ, 2010 р.
 24. Бардик Є. І., Вожаков Р. В. Прогнозування технічного стану і ресурсу електрообладнання з використанням нечіткого регресійного аналізу. Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів: «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», НТУУ «КПІ», Київ, 2010 р.
 25. Бардик Є. І., Соколенко Д. О. Аналіз методів оцінки надійності персоналу електроенергетичних об'єктів. Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів: «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», НТУУ «КПІ», Київ, 2010 р.
 26. Бондаренко В. І., Венік О. Ю. Аналіз методів розрахунку комутаційного ресурсу і прогнозування допустимої кількості відключень вимикачів. Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів: «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», НТУУ «КПІ», Київ, 2010 р.
 27. Бардик Є. І., Бондаренко Є. І., Соколенко Д. О., Кубрак О. В. Розробка інтелектуальних компонентів прототипу експертної системи діагностування технічного стану силових трансформаторів. Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів: «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», НТУУ «КПІ», Київ, 2010 р.
 28. Бардик Є. І., Безбереж'єв Ю. В., Радіонова В. В. Аналіз роботи джерел аварійного електропостачання атомних електростанцій. Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів: «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», НТУУ «КПІ», Київ, 2010 р.
 29. Бардик Є.І., Лукаш М.П. Електрична частина електростанцій та підстанцій. Силові трансформатори. –К.: НТУУ "КПІ", 2010.-84с.

Доповіді конференціях:

1. X Міжнародна науково-технічна конференції "Проблеми сучасної електроенерготехніки 2008" (1-3 червня 2008р., м. Київ, Україна)
2. XI Міжнародна науково-технічна конференції "Проблеми сучасної електроенерготехніки 2010" (1-3 червня 2010р., м. Київ, Україна)
3. Міжнародна науково-технічна конференції "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики".- Київ: НТУУ "КПІ", 2009.
4. Міжнародна науково-технічна конференції "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики" .- Київ: НТУУ "КПІ", 2010.