Nonlinear Dynamics and Applications



Proceedings of the Twenty nine Anniversary Seminar NPCS'2022
 June 21-24, 2022, Minsk, Belarus
 Fractals, Chaos, Phase Transitions, Self-organization

Editors V.A. Shaparau A.G. Trifonov

Volume 28 2022

УДК 53(061.3) ББК 22.3(Англ.) H72

Nonlinear Dynamics and Applications : Proceedings of the Twenty nine Anniversary Seminar NPCS'2022, Minsk, June 21-24, 2022 = Нелинейная динамика и приложения : труды XXIX Международного семинара, Минск, 21-24 июня 2022 г. / редкол.: В. А. Шапоров [и др.]; под ред. В. А. Шапорова, А. Г. Трифонова; Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – «Сосны» НАН Беларуси. – Минск : Право и экономика, 2022. – 486 с.

ISBN 978-985-887-029-4.

УДК 53(061.3) ББК 22.3(Англ.)

Редакционная коллегия: В. А. Шапоров, А. Г. Трифонов, Л. Ф. Бабичев,

ISBN 978-985-887-029-4

 © Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – «Сосны» НАН Беларуси», 2022
 © Оформление. ИООО «Право и экономика», 2022

Научное издание

Nonlinear Dynamics and Applications : Proceedings of the Twenty nine Anniversary Seminar NPCS'2022, Minsk, June 21-24, 2022 = Нелинейная динамика и приложения : труды XXIX Международного семинара, Минск, 21-24 июня 2022 г.

Технический редактор В.Г. Гавриленко

Подписано в печать 22.09.2022 Формат 60х84_{1/8} Бумага офсетная Печать цифровая Усл.печ.л. 60,6 Уч.изд.л. 60,9 Тираж 100 экз. Заказ 5132 ИООО «Право и экономика» 220072 Минск Сурганова 1, корп. 2 Тел. 8 029 684 18 66 Отпечатано на издательской системе Gestetner в ИООО «Право и экономика» Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий, выданное Министерством информации Республики Беларусь 17 февраля 2014 г. в качестве издателя печатных изданий за № 1/185



Нелинейные процессы деградации элементов конструкций объектов атомной энергетики и управление их старением на базе интеллектуальных сенсорных сетей и нейросетевых технологий

Буймистрюк Г.Я. доктор технических наук, профессор Техническая академия Росатома, Санкт-Петербург Э-почта: BGY812@mail.ru

Рассмотрены нелинейные процессы деградации узлов атомных станций, важных для безопасности, с целью создания отраслевой системы по управлению старением элементов, конструкций и систем на всех этапах жизненного цикла энергоблоков. Показано, что процессы деградации сложных конструкций ядерных реакторов не адекватны экспоненциальным аппроксимациям, а имеют различные нелинейные пространственно -временные зависимости, текущую информацию о которых необходимо непрерывно получать с помощью встроенных интеллектуальных сенсорных сетей и оценивать сложные процессы деградации на основе искусственных нейронных сетей – универсальных нейросетевых аппроксиматоров. Приведены примеры измерения и управления старением ядерных реакторов III и IV поколений.

Ключевые слова: элементы конструкции, управление старением, интеллектуальные датчики, нейронные сети

1 Введение

В процессе эксплуатации атомных станций (AC) происходят негативные структурные изменения конструкционных материалов и самих элементов конструкции (ЭК) AC, то есть их деградация под воздействием механических нагрузок, температуры и окружающей среды. Выход из строя ЭК AC и к технологическим остановам с потерей многих MBT энергии, снижению безопасности и риску возникновения аварий - как проектных (ПА), так и запроектных (ЗПА) [1].

К основным ЭК AC относятся строительные конструкции, оборудование, трубопроводы, приборы, средства измерений (КИП и A), кабели и др., обеспечивающие выполнение заданных функций самостоятельно или в составе систем, являющихся структурными единицами анализа надёжности и безопасности при проектировании AC [2].

Управление ресурсом энергоблоков AC состоит, в том числе, в контроле и мониторинге процессов деградации, старения и повреждения ЭК. Замедление и ослабление старения ЭК достигается посредством своевременного технического обслуживания и ремонта (ТОиР) и глубокоэшелонированной защитой (ГЭЗ) AC.

Основой контроля и мониторинга процессов накопления повреждений, в том числе выявление деградации ЭК АС являются методы неразрушающего контроля (НК).

Традиционный подход к анализу целостности оборудования и трубопроводов АЭС строится, в основном, на проведении неразрушающего ультразвукового контроля металла оборудования и трубопроводов. Однако, ультразвуковой метод НК не позволяет определить момент зарождения дефекта и строится на вольном допущении того, что при остановке энергоблока на плановый ремонт дефект будет своевременно выявлен и динамика его развития не даст ему быстро прорасти до недопустимого уровня, когда происходит его быстрое развитие до сквозного с потерей теплоносителя. Предпочтительнее контролировать состояние целостности в процессе эксплуатации оборудовании, когда и происходит зарождение и развитие дефектов. Из всех известных методов НК, метод акустической эмиссии является наиболее подходящим для решения такой задачи [4], [5].

Датчики АЭ на базе радиационно-стойкой и термостойкой волоконной оптики наиболее перспективны для непрерывного мониторинга ЭК в процессе эксплуатации АС [6], [7].

По сравнению с другими методами НК, метод АЭ для атомных станций имеет ряд преимуществ:

 возможность проведения текущего контроля и обнаружение развивающихся дефектов непосредственно в ходе эксплуатации и, следовательно, наиболее опасных дефектов в наиболее нагруженных компонентах реакторной установки;

– возможность определения мест расположения дефектов (трещин, зон пластической деформации, утечек и др.), находящихся достаточно далеко от приемных акустико-эмиссионных преобразователей;

– контроль в реальном масштабе времени и, как следствие, своевременное обнаружение течи теплоносителя из сосудов давления и трубопроводов в труднодоступных местах ядерной энергетической установки при развитии аварийной ситуации;

– совместимость АЭ метода с другими методами НК, в частности УЗК, что позволяет за счет использования нескольких независимых методов повысить надежность и достоверность результатов контроля;

– возможность проведения дистанционного автоматизированного контроля в необслуживаемых радиационно-опасных зонах помещений атомной станции.

`2. Глубокоэшелонированная защита атомных станций

Последствия отказа ЭК АС имеют разные степени тяжести, что соответствует разным классам безопасности, как показано в Таблице 1.

270000000000000000000000000000000000000	Тяжесть последствий отказа элемента АЭС			
элементы систем нормальной эксплуатации	Неприемлемая ² Класс 1	Высокая ³ Класс 2	Средняя ⁴ Класс 3	Низкая ⁵ Класс 4
Drovoury overes	Тяжесть последствий при отказе классифицируемого элемента при возникновении ИС проектной аварии			
Элементы систем безопасности	Превышаются проектные пределы при про- ектных авариях Класс 2		Не превышаются проектные пределы при проектных авариях Класс 3	
Элементы,	Время после ИС, по истечении которого необходима работа классифицируемого			
используемые	элемента			
при управлении				
ЗПА, входящими	Менее	3 суток	Более .	3 суток
в окончательный Класс 3		Кла	icc 4	
перечень ЗПА				

Подчеркнём, что необходим дифференцированный подход к

обеспечению качества ЭК АС в зависимости от влияния этих ЭК на безопасность АС.

В таблице 2 указаны классы безопасности ЭК и срок их службы (эксплуатации), приведены механизмы старения ЭК реакторной установки ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.

Таблина	2
гаолица	_

Наименование компонента	Класс безопасности по НП-001-2015; срок службы, лет	Механизм старения
Корпус реактора	1	- Температурное старение
	60	- Радиационное охрупчивание
		- Усталость
		- Циклический рост трещины
Выгородка (ВКУ)	2	- Радиационное распухание
	60	- Усталость
Корпус парогенератора,	1	- Температурное старение
включая 111 СС	60	- Усталость
		- Коррозия
		- Циклический рост трещины
		- Коррозионный статический и
		циклический рост трещины с
		учётом ЗДКР
Теплообменные трубы	2	- Усталость
	60	- коррозия (коррозионное
		растрескивание под напряжением
		(KHP))
		 Коррозионный статический и
		циклический рост трещины

где обозначены:

НП-001-2015 – нормы и правила Ростехнадзора по безопасности AC. ВКУ – внутрикорпусные устройства; СС – сварные соединения. Отказы ЭК AC ведут к:

 частичной/полной утрате работоспособности систем безопасности АС;
 снижению готовности противоаварийной системы к предотвращению перехода нормальной эксплуатации в проектную аварию, то есть деградация 2-го уровня ГЭЗ - от нормальной эксплуатации до проектной аварии.

Для управления проектными авариями служат штатные системы безопасности АС. Для управления запроектными авариями (ЗПА) служат дополнительные технические средства, работающие в экстремальных условиях [6].

Важно подчеркнуть, что вероятность тяжёлой ЗПА в предположении отказа технических средств управления ЗПА в разы (на порядок) превосходит вероятность тяжёлой ЗПА в предположении работоспособности этих технических средств. И с детерминистской и с вероятностной точек зрения влияние технических средств управления ЗПА значимо влияют на

безопасность AC, что практически подтвердилось при ЗПА на АЭС «Фукусима-Даиси» в 2011 году.

3. Контроль за деградацией и старением элементов конструкций атомных станций

В основе управления старением лежит принцип контролируемой эксплуатации ЭК АС. Важен также прогноз старения ЭК АС и оценка их остаточного ресурса. Важно отметить, что скорости изменений в разных ЭК при старении различны, что обусловливает нелинейный характер деградации с переходом к внезапным отказам.

Контрольные средства для оценки скорости процессов старения это средства НК с формированием базы данных, служащей для применения статистических методов анализа разрушения и оценки остаточного ресурса ЭК АС для проведения ТОиР, как показано на рис. 1.



Рис. 1 Схема операций управления старением ЭК АС

Количество точек контроля компонентов системы теплоносителя реактора (CTP):

- корпуса и крышки реактора;
- парогенератора;
- компенсатора давления;
- трубопроводов,

определяется по результатам моделирования и расчётов прочности и составляет до 25 точек при малоцикловых усталостных повреждениях.

Важной тенденцией в методологии контроля и мониторинга старения ЭК AC стал переход от контроля по свидетелям к прямому безобразцовому контролю ЭК в реальном масштабе времени.

Одной из разработанных и серийно производимых систем контроля деградации ЭК АС является система автоматизированного контроля остаточного ресурса (САКОР) оборудования реакторной установки [3].

Система САКОР предназначена для:

 выявления неблагоприятных нагружающих факторов от перемещения оборудования, термоударов, термопульсаций теплоносителя и оптимизации эксплуатационных режимов;

- контроля напряженного состояния зон выявленных повреждений кармана коллектора парогенератора;

 контроля накопленного усталостного повреждения и оценки остаточного ресурса корпуса реактора с крышкой, компенсатора давления,

парогенераторов, главных циркуляционных трубопроводов, трубопроводов системы компенсации давления;

Под накопленным усталостным повреждением ЭК АС понимается их повреждение в результате циклических нагрузок.

Для выполнения своих функций, САКОР получает информацию от датчиков системы внутриреакторного контроля (СВРК) и от штатных датчиков технологического контроля АСУ ТП. Цикл сбора информации составляет 1 с.

Система САКОР, производится АО СНИИП Росатома, используется на Ленинградской АЭС-2 в составе СКУД (система контроля, управления и диагностики) и предназначена для контроля накопленного усталостного повреждения и оценки остаточного ресурса оборудования энергоблока.

4. Методы анализа процессов деградации

Неоднородные процессы деградации сложных систем ЭК с постепенными и внезапными отказами исследованы статистическими методами [8].

Для случая произвольных (неэкспоненциальных) распределений высоконадёжных систем при редких отказах ЭК применяют имитационное моделирование на основе метода расщепления для ускоренного построения циклов восстановления ЭК.

Метод имитационного моделирования для редких отказов предложен, так как аналитическое вычисление характеристик неоднородных процессов деградации невозможно, а метод Монте-Карло является трудоёмким по времени для вычислений с высокой точностью (малой дисперсией).

Для анализа надёжности и отказоустойчивости систем безопасности AC стали активно применяться нейросетевые методы [9].

Искусственные нейронные сети (ИНС) используются тогда, когда неизвестен точный вид связей между входами и выходами. Например, система

аварийной защиты реактора. Работу реакторной установки нужно оценивать при всех возможных отказах во всех комбинациях.

В конкретном проекте РУ ВВЭР есть 61 орган регулирования. В итоге получаем: отказ одного компонента повлечет за собой 61 комбинацию отказов, двух — 1830, трех — 35990 и т.д. Состояние активной зоны РУ при каждой комбинации будет разным, поэтому выполнить компьютерное моделирование для каждого отдельного случая практически невозможно, так как требует больших затрат времени. Картограммы же активной зоны реактора с обозначением отказавших органов регулирования СУЗ АС представляют растровые изображения, для распознавания образов которых оптимальны нейронные сети. На рис. 2а приведена картограмма отказов органов управления системы управления защитой (СУЗ) активной зоны реактора, а на рис. 2b показан принцип работы ИНС для этой задачи.

Если сеть обучена экспертами в области деградации ЭК AC, она приобретает способность моделировать функцию, связывающую значения входных и выходных переменных, и впоследствии такую сеть можно использовать для прогнозирования в ситуации, когда выходные значения неизвестны.

В итоге, можно заключить, что и известные адаптивные фильтры и ИНС базируются на общем математическом аппарате — нелинейном методе наименьших квадратов (НМНК) — для отыскания весовых коэффициентов. Общей платформой для экспертного обучения ИНС является моделирование ИНС в системе MATLAB/Simulink.





Точная математическая модель калибровочных характеристик встроенных сенсоров не только неизвестна, но часто ее получение невозможно или связано со значительными трудностями. Действительно, традиционные параметрические методы построения калибровочных характеристик, такие как регрессионный и конфлюентный анализ, основаны на предварительном выборе некоторого класса функций, в рамках которого осуществляется поиск наилучшей, по определенному критерию, аппроксимации.

Однакоиз-за нелинейности характеристик отклика встроенных датчиков и их функционирования в сложной внутренней и внешней среде возникает проблема неопределенности в достоверности сенсорной информации. В связи с этим становится актуальной задача применения непараметрических методов оценивания метрологических характеристик.

Наиболее перспективно применение ИНС для непараметрического оценивания метрологических характеристик сенсорных сетей.

Главное преимущество нейросетевых методов оценивания в том, что они обобщаются на случай нелинейного сжатия информации, когда никаких явных статистических решений не существует. Поэтому, нейросетевой анализ сигналов решает проблему точного оценивания метрологических характеристик встроенных сенсоров. Нейросетевой подход к метрологической проверке встроенных датчиков и измерительных сенсорных сетей обоснован в работе [10].

Применение моделей ИНС обеспечивает инвариантность преобразования по отношению к шумам и нестабильности входных измерительных сигналов. По сути, ИНС являются универсальными аппроксиматорами, что позволяет эффективно использовать их в качестве моделей различных нелинейных преобразователей сигналов, в том числе измерительных датчиков, приборов и систем.

Суммарная методическая погрешность, вносимая структурой ИНС и качеством её обучения, оценивается по формуле:

$$\delta_{CT} + \delta_{OF} \leq \delta_{T} - \delta_{\mathcal{A}}, \ \delta_{T} > \delta_{\mathcal{A}},$$

где: δ_{CT} – систематическая погрешность, вносимая данной структурой ИНС; δ_{OE} – методическая погрешность, вносимая качеством обучения ИНС; δ_{T} – погрешность ИНС, оцененная на тестовой выборке; $\delta_{\mathcal{A}}$ - относительная методическая погрешность.

Ошибки моделей ИНС обусловлены неточностью оценок синапсических весовых коэффициентов ИНС, полученных в результате обучения модели, а также неточностью технической реализации ИНС на основе цифровых вычислительных устройств с ограниченной разрядностью.

В ходе моделирования параметры модели ИНС (универсального аппроксиматора) и полиномиальной аппроксимирующей модели 3-го порядка были изменены на 1% от номинальных значений. В результате метрологические характеристики ИНС-моделей встроенных в ЭК АС измерительных датчиков с нейросетевым аппроксиматором получаются в несколько раз лучше, чем у классических преобразователей с полиномиальной аппроксимацией, а именно, погрешности модели ИНС не превышают 2%, а погрешности полиномиальной модели составляют от 6% до 12% как показанов работе [10].

5. Интеллектуальные сенсорные сети для атомных станций

Построение интеллектуальных датчиков с функцией метрологического самоконтроля (осуществляемой ими в процессе эксплуатации АС нового поколения – на основе волоконно-оптических технологий предполагает наличие у таких датчиков минимальной структурной и/или максимальной информационной избыточности [7].

Для интеллектуализации средств измерений с применением интеллектуальных волоконно-оптических датчиков не требуется вводить дополнительные структурные и информационные избыточности, требуются только спектрально перестраиваемые оптические излучатели или фильтры, которые являются разновидностью стандартных оптоэлектронных приборов.

6. Особенности контроля деградации реакторов III и IV поколения

Атомные реакторы III поколения типа ВВЭР работают при температурах до 350 °C и давлениях до 18 МПа, что позволяет применять для контроля деградации традиционные технические средства НК, в том числе система САКОР. Однако, при этом, большинство операций контроля за деградацией и управления старением ЭК АС производится в периоды проведения ТОиР, что,с учётом нелинейного характера развития дефектов и износа арматуры, не исключает риска отказов ЭК и аварий в процессе работы РУ АС на мощности.

Ядерные реакторы IV поколения типа БРЕСТ (быстрый реактор с естественной безопасностью) работают при закритическими значениями температур до 650 °C и давлений до 38 МПа, то есть ЭК и датчики работают фактически в режиме ускоренной деградации, что обусловливает применения термостойких и радиационно-стойких оптико-волоконных интеллектуальных средств НК, обеспечивающих непрерывный мониторинг состояния всех ответственных ЭК АС в процессе эксплуатации [7].

7. Выводы

В силу нелинейности процессов деградации элементов, конструкций и систем AC необходим непрерывный мониторинг их технического состояния встроенными сенсорами при работе ядерных реакторов на мощности.

Для анализа процессов деградации и отказов элементов конструкции AC и обеспечения высоких метрологических характеристик встроенных датчиков наиболее эффективным является применение нейросетевых технологий.

Использование встроенных измерительных сенсоров для мониторинга элементов, конструкций и систем AC в постоянном режиме работы необходимо производить измерения с помощью интеллектуальных датчиков с функцией метрологического самоконтроля, то есть самокалибровки в реальном масштабе времени в процессе эксплуатации.

Перспективные ядерные реакторы IV поколения работают фактически в режиме ускоренной деградации и требуют обязательного контроля состояния.

Ссылки

[1] Ageing Management and Development of a Program for Long Term Operation of Nuclear Power Plants. SSG-48, IAEA Safety Standard, Vienna, 2018. – 88 p.

[2] Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций. НП 084-15. –М. Ростехнадзор, 2016. - 95 с.

[3] Основные принципы построения системы автоматизированного контроля циклического остаточного ресурса РУ ВВЭР-1000 // Сборник трудов 2-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ Гидропресс,

Подольск, 19-23 ноября 2001, с. 1-11

[4] Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2004. -344 с.

[5] Бакиров М.Б., Поваров В.П. и др. Разработка технологии непрерывного акустико-эмиссионного мониторинга эксплуатационной повреждаемости металла оборудования атомных станций. – Известия вузов «Ядерная энергетика», 2014, №3, с. 15-24.

[6] Буймистрюк Г.Я., Сафонов С.И, Ильин А.В. Оптоволоконные измерительные каналы автоматизированных систем управления объектами атомной энергетики в экстремальных условиях. – Автоматизация и ИТ в энергетике, 2018, № 9, с. 52-58.

[7] Buymistriuk G.Y. Radiation-hard and intelligent optical fiber sensors for nuclear power plants. - In book: "Nuclear Power Control, Reliability and Human Factors". -Intech, 2011, DOI:<u>10.5772/1830</u>.

[8] Бородина А.В., Тищенко В.А. Имитационное моделирование неоднородных процессов деградации в системе с постепенными и внезапными отказами. – Труды Карельского НЦ РАН, 2018, №7, с. 3-13.

[9] Козлачков А.Н., Быков М.А., Сиряпин В.Н. Применение искусственных нейронных сетей для анализа надёжности аварийной защиты реакторов. – Вопросы атомной науки и техники, 2015, №3, с. 3-14.

[10] Buymistriuk G.Y. Metrology of nerve-similar sensing systems in anthropomorphic robots and living organisms. - Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1379:012038. DOI: 10.1088/1742-6596/1379/1/012038

Nonlinear processes of degradation of structural elements of nuclear power facilities and their aging management based on intelligent sensors nets and neural network technologies

G. Ya. Buymistriuk¹ D-r of Sciences, professor The Technical Academy of Rusatom, St-Petersburg Branch

Nonlinear processes of degradation of nuclear power plant components important for safety are considered in order to create an industry system for managing the aging of elements, structures and systems at all stages of the life cycle of power units. It is shown that the degradation processes of complex structures of nuclear reactors are not adequate to exponential approximations, but have various nonlinear space-time dependencies, current information about which must be continuously obtained using embedded intelligent sensor networks and evaluate complex degradation processes based on artificial neural networks – universal neural network approximators. Examples of measurement and control of aging of nuclear reactors of III and IV generations are given.

Keywords: NPP, structural elements, degradation, aging management, intelligent sensors, neural networks

1. Introduction

During the operation of nuclear power plants (NPP), negative structural changes occur in the structural materials and the structural elements (SE) themselves of the NPP, that is, their degradation under the influence of mechanical loads, temperature and the environment. The failure of the SE NPP and to technological installations with the loss of many MW of energy, reduced safety and the risk of accidents both design (DA) and out of design (ODA) [1].

The main SE NPP include building structures, equipment, pipelines, instruments, measuring instruments (instrumentation and control systems), cables, etc., ensuring the performance of specified functions independently or as part of systems that are structural units of reliability and safety analysis in the design of NPP [2].

Resource management of NPP power units consists, among other things, in the control and monitoring of the processes of degradation, aging and damage to the EC. The deceleration and weakening of the aging of the SE is achieved through timely maintenance and repair (TM&R) and deep-echeloned protection (DEP) of the NPP. The basis for monitoring of damage accumulation processes, including the detection of SE degradation, are non-destructive testing (NDT) methods.

The traditional approach to analyzing the integrity of NPP equipment and pipelines is based mainly on conducting non-destructive ultrasonic testing of metal equipment and pipelines. However, the ultrasonic method of NDT does not allow to determine the moment of the origin of the defect and is based on the

¹ <u>E-mail:BGY812@mail.ru</u>

Nonlinear processes of degradation of structural elements of nuclear power facilities and their aging management based on intelligent sensors nets and neural network technologies

free assumption that when the power unit is stopped for scheduled repairs, the defect will be detected in a timely manner and the dynamics of its development will not allow it to quickly grow to an unacceptable level when its rapid development occurs to a through with loss of coolant (LOCA).

It is preferable to monitor the state of integrity during the operation of the equipment, when the origin and development of defects occur. Of all the known NDT methods, the acoustic emission method is the most suitable for solving such a problem [4], [5].

AE sensors based on radiation-hard and heat-resistant fiber optics are the most promising for continuous monitoring of the SE during the operation of NPP [6], [7].

Compared with other NDT methods, the AE method for nuclear power plants has a number of advantages:

- the ability to conduct routine monitoring and detect developing defects directly during operation and, consequently, the most dangerous defects in the most loaded components of the reactor plant;

- the ability to determine the locations of defects (cracks, zones of plastic deformation, leaks, etc.) located far enough from the receiving acoustic-emission transducers;

- real-time monitoring and, as a result, timely detection of coolant leaks from pressure vessels and pipelines in hard-to-reach places of a nuclear power plant in the event of an emergency;

- compatibility of the AE method with other NDT methods, in particular narrow, which allows, through the use of several independent methods, to increase the reliability of control results;

- the possibility of remote automated monitoring in unattended radiationhazardous areas of the premises of the nuclear power plant.

2.Deep-echeloned protection of the nuclear power plants

The consequences of SE NPP failure have different degrees of severity, which corresponds to different safety classes, as shown in Table 1.

Table 1

Flements of the	Severity of consequences of NPP element failure			
normal operation system	Unacceptable Class 1	High Class 2	Medium Class 3	Low Class 4
Elements of the safety system	Severity of the consequences of failure of a classified element in the event of a design basis accident			
	Exceeds the design limit at design basis accident Class 2		The design limit is not exceeded the design basis accident Class 3	
Elements of the system used in the	Time after the initial event, after which the operation of the classified item is required			
management of the ODA, included in the final list of ODAs	Less than 3 days Class 3		More than 3 days Class 4	

We emphasize that there is a need for a differentiated approach to ensuring the quality of SE NPP, depending on the impact of these SE on the safety of the NPP. Table 2 shows the SE safety classes and their lifetime, the mechanisms of aging of the VVER-1000 and VVER-1200 reactor installations.

Table 2

Component name	Safety class / Lifetime, years	The mechanism of aging
Reactor vessel	1 60	-Temperature cracking - Radiation embrittlement - Fatigue - Cyclic crack growth
Baffle (VKU)	2 60	- Radiation swelling - Fatigue
Steam generator housing, including 111 welded joints (CC)	1 60	 Temperature cracking Fatigue Corrosion Cyclic crack growth Corrosion Static and Cyclic Crack Growth
Heat Exchange Tubes	2 60	 Fatigue Stress corrosion cracking Corrosion Static and Cyclic Crack Growth

where are indicated:

VKU – internal devices; CC – welded joints.

Failures of the SE NPP lead to:

- partial / complete loss of operability of the safety systems of the NPP;
- reduction of the readiness of the emergency response system to prevent

Nonlinear processes of degradation of structural elements of nuclear power facilities and their aging management based on intelligent sensors nets and neural network technologies

the transition of normal operation into a design accident, that is, degradation of the 2nd level of the DEP: from normal operation to a design accident. For the management of design accidents, the standard safety systems of NPP are used. Additional technical means operating in extreme conditions are used to manage out-of-design accidents (ODA) [6].

It is important to emphasize that the probability of a severe ODA in the assumption of failure of technical controls ODA several times (by an order of magnitude) exceeds the probability of a severe ODA in the assumption of the operability of these technical means. Both from a deterministic and probabilistic point of view, the influence of technical controls of the ODA significantly affects the safety of the NPP, which was practically confirmed during the ODA at the Fukushima Daishi NPP in 2011.

3. Control of degradation and ageing of structural elements of NPP

Ageing management is based on the principle of controlled operation of the SE NPP. It is also important to predict the aging of the SE NPP and the assessment of their residual resource. It is important to note that the rates of changes in different SE during aging are different, which determines the nonlinear nature of degradation with a transition to sudden failures. Control tools for assessing the rate of aging processes are NDT tools with the formation of a database that serves for the application of statistical methods of destruction analysis and evaluation of the residual resource of the SE for conducting TM&R as shown in Figure 1.



Figure 1 Diagram of SE NPP ageing control operations

The number of control points of the components of the reactor coolant system: - reactor housings and covers, - steam generator, - pressure compensator - pipelines, is determined by the results of modeling and strength calculations and is up to 25 points for low-cycle fatigue damage.

An important trend in the methodology of control and monitoring of the aging of the SE NPP has been the transition from control by witnesses to direct ugly control of the SE in real time. One of the developed and mass-produced systems for monitoring the degradation of the SE NPP is the system of automated control of the residual life (SAKOR) of the reactor plant equipment [3].

The SAKOR system is designed for:

- identification of unfavorable loading factors from equipment movement, thermal shocks, thermal pulsations of the coolant and optimization of operational modes;

- monitoring of the stress state of the zones of detected damage to the collector pocket of the steam generator;

- monitoring of accumulated fatigue damage and evaluation of the residual life of the reactor vessel with a lid, pressure compensator, steam generators, main circulation pipelines, pipelines of the compensation system pressure.

Accumulated fatigue damage of the SE NPP is understood as their damage as a result of cyclic loads. To perform its functions, SAKOR receives information from the sensors of the in-reactor control system and from the standard sensors of the technological control of the automated process control system. The information collection cycle is 1 s. The SAKOR system, produced by SNIIPRusatom, is used at Leningrad NPP-2 as part of the CMDS (control, management and diagnostics system) and is designed to monitor accumulated fatigue damage and assess the residual life of the power unit equipment.

4. Methods of analysis of degradation processes

Heterogeneous degradation processes of complex SE systems with gradual and sudden failures have been studied by statistical methods [8].

For the case of arbitrary (non-exponential) distributions of highly reliable systems with rare SE failures, simulation modeling based on the splitting method is used to accelerate the construction of SE recovery cycles. The simulation method for rare failures is proposed, since analytical calculation of the characteristics of heterogeneous degradation processes is impossible, and the Monte Carlo method is time-consuming for calculations with high accuracy (low variance).

Neural network methods have been actively used to analyze the reliability and fault tolerance of NPP safety systems [9].

Nonlinear processes of degradation of structural elements of nuclear power facilities and their aging management based on intelligent sensors nets and neural network technologies

Artificial neural networks (ANN) are used when the exact type of connections between inputs and outputs is unknown. For example, the reactor emergency protection system. The operation of the reactor plant should be evaluated for all possible failures in all combinations. There are 61 regulatory bodies in a specific project of the RU VVER. As a result, we get: the failure of one component will entail 61 combinations of failures, two — 1830, three — 35990, etc. The state of the reactor core will be different for each combination, so it is almost impossible to perform computer modeling for each individual case, since it requires a lot of time. Cartograms of the reactor core with the designation of the failed regulatory bodies of the protection control system (PCS) NPP represent raster images, for the recognition of images of which neural networks are optimal.

Figure 3a shows a cartogram of failures of the controls of the PCS of the reactor core, and Figure 3b shows the principle of operation of the ANN for this task.



Fig. 2 The principle of failure recognition of PCS NPP using the ANN

If the network is trained by experts in the field of SE NPP degradation, it acquires the ability to model a function linking the values of input and output variables, and subsequently such a network can be used to predict in a situation where the output values are unknown. As a result, it can be concluded that the well—known adaptive filters and ANN are based on a common mathematical apparatus — the nonlinear least squares method - for finding weighting coefficients. A common platform for expert training of ANN is the simulation of ANN in the MATLAB/Simulink system.

The exact mathematical model of the calibration characteristics of embedded sensors is not only unknown, but it is often impossible to obtain it or is associated with significant difficulties. Indeed, traditional parametric methods of constructing calibration characteristics, such as regression and confluent analysis, are based on the preliminary selection of a certain class of functions, within which the search for the best approximation, according to a certain criterion, is carried out. However, due to the non-linearity of the response characteristics of the embedded sensors and their functioning in a complex internal and external environment, the problem of uncertainty in the reliability of sensory information arises, the requirements for metrological support of which are set out in paragraph 62 of the Rules for monitoring the equipment of the NPP [2]. In connection with the above, the task of applying nonparametric methods for assessing metrological characteristics becomes urgent. The most promising application of ANN is for nonparametric evaluation of metrological characteristics of sensor networks.

The main advantage of neural network estimation methods is that they are generalized to the case of nonlinear compression of information when there are no explicit statistical solutions. Therefore, neural network analysis of signals solves the problem of accurate estimation of metrological characteristics of embedded sensors. The neural network approach to metrological verification of embedded sensors and measuring sensor networks is justified in [10].

The use of ANN models ensures the invariance of the transformation with respect to noise and instability of the input measurement signals. According to the network, ANN are universal approximators, which makes it possible to effectively use them as models of various nonlinear signal converters, including measuring sensors, devices and systems.

The total methodological error introduced by the ANN structure and the quality of its training is estimated by the formula:

 $\delta_{\it CT} + \delta_{\it OF} \leq \delta_{\it T} - \delta_{\it A}, \qquad \delta_{\it T} > \delta_{\it A},$

where: δ_{CT^-} systematic error introduced by selected structure ANN; δ_{OE^-} methodological error introduced by the quality of trainingANN; δ_{T^-} error of the ANN estimated on the test sample; $\delta_{\mathcal{I}^-}$ relative methodological error.

The errors of the ANN models are due to the inaccuracy of the estimates of the synaptic weight coefficients of the ANN obtained as a result of training the model, as well as the inaccuracy of the technical implementation of the ANN based on digital computing devices with limited bit depth.

During the simulation, the parameters of the ANN (universal approximator) model and the 3rd-order polynomial approximating model were changed by 1% of the nominal values. As a result, the metrological characteristics of the ANN models of measuring sensors embedded in the SE NPP with a neural network approximator are obtained several times better than those of classical converters

Nonlinear processes of degradation of structural elements of nuclear power facilities and their aging management based on intelligent sensors nets and neural network technologies

with polynomial approximation, namely, the errors of the ANN model do not exceed 2%, and the errors of the polynomial model range from 6% to 12% as shown in [10].

5. Intelligent sensor networks for nuclear power plants

The construction of intelligent sensors with the function of metrological self-monitoring (carried out by them during the operation of the NPP) of a new generation - based on fiber-optic technologies assumes that such sensors have minimal structural and/or maximum information redundancy [7].

For the intellectualization of measuring instruments using intelligent fiberoptic sensors, it is not necessary to introduce additional structural and information redundancy, only spectrally tunable optical emitters or filters are required, which are a kind of standard optoelectronic devices.

6. Features of degradation control of III and IV generation reactors

Nuclear reactors of the III generation of the VVER type operate at temperatures up to 350 °C and pressures up to 18 MPa, which allows the use of traditional NDT technical means, including the SAKOR system, for degradation control. However, at the same time, most of the degradation control and aging

control operations of the SE of NPP are carried out during the periods of maintenance and repair, which, taking into account the nonlinear nature of the growth of defects and wear of fittings, does not exclude the risk of SE failures and accidents during the operation of the NPP reactors at power.

Generation IV BREST-type nuclear reactors (fast reactor with natural safety) operate at subcritical temperatures up to 650 °C and pressures up to 38 MPa, i.e. SE and sensors operate in accelerated degradation mode, which requires application of heat and radiation resistant optical-fiber intelligent NDT means ensuring continuous monitoring of all critical SE of the NPP during operation [7].

7. Conclusions

Due to the nonlinearity of the degradation processes of elements, structures and systems of nuclear plants, it is necessary to continuously monitor their technical condition with embedded sensors during the operation of nuclear reactors at power. To analyze the processes of degradation and failures of the elements of NPP design and to ensure high metrological characteristics of the embedded sensors, the most effective is the use of neural network technologies.

The use of embedded measuring sensors for monitoring of elements, structures and systems of NPP in continuous operation mode is necessary to

make measurements using intelligent sensors with the function of metrological self-checking, i.e. self-calibration in real time during operation.

Generation IV advanced nuclear reactors actually operate in an accelerated degradation mode and require mandatory condition monitoring.

References

[1] Ageing Management and Development of a Program for Long Term Operation of Nuclear Power Plants. / SSG-48 : IAEA Safety Standard, Vienna, 2018. – 88 p.

[2] The rules for the control of base metal, welded joints and surfaced surfaces during the operation of equipment, pipelines and other elements of nuclear power plants. NP-084-15. - M.: Rostechnadzor, 2016. - 95 p.

[3] Basic principles of construction an automated control system for cyclic residual life with the VVER-1000 // Bogachev A.V., Bakirov M.B. et al. – Proc. of the 2nd Int. Conf. "Ensuring the safety of nuclear power plants with reactor unit VVER", OKB Gidropress, Podolsk, November 19-23, 2001, pp. 1-11.

[4] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibration and noise diagnostics of VVER. –M.: Energoatomizdat, 2004. -344 p.

[5]Bakirov M.B., Povarov V.P., etc. Development of technology for continuous acoustic emission monitoring of operational metal damage of nuclear power plant equipment. – Izvestiyavuzov "Nuclear Power Engineering", 2014, No. 3, pp. 15-24.

[6] BuimistryukG.Ya., Safonov S.I., Ilyin A.V. Fiber-optic measuring channels of automated control systems for nuclear power facilities under extreme conditions. – Automation and IT in the energy sector, 2018, No. 9, pp. 52-58.

[7] Buymistriuk G.Y. Radiation-hard and intelligent optical fiber sensors for nuclear power plants. - In book: "Nuclear Power Control, Reliability and Human Factors". -Intech, 2011, DOI:<u>10.5772/1830</u>.

[8] Borodina A.V., Tishchenko V.A. Simulation modeling of heterogeneous degradation processes in a system with gradual and sudden failures. – Proceedings of the Karelian SC RAS, 2018, No. 7, pp. 3-13.

[9]Kozlachkov A.N., Bykov M.A., Siryapin V.N. Application of artificial neural networks to analyze the reliability of emergency protection of reactors. – Issues of Atomic Science and Technology, 2015, No. 3, pp. 3-14.

[10] Buymistriuk G.Y. Metrology of nerve-similar sensing systems in anthropomorphic robots and living organisms. - Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1379:012038.DOI:<u>10.1088/1742-6596/1379/1/012038.</u>

Contents

	Preface	7
1.	Dirac Like Equations and Generalized Majorana Fields, Symmetry Aspects	
	P.P. Andrusevich	8
2.	Hardronic Interactions of Strange Mesons E.Z. Avakyan, S.L. Avakyan	33
3.	The Role of Intermediate Scalar States in the Description of Pseudoscalar Meson Scattering Processes E.Z. Avakyan, S.L. Avakyan	40
4.	Monte Carlo Analysis of Charged Hadron Yield Distribution in Au+Au Collisions for Different Parton Energy Loss Models L.F. Babichev, Y.A. Rusak	49
5.	Isotopic Composition of the Core and Antineutrino Spectra Production in the VVER-1200 Reactor L.F.Babichev, I.V. Rudziankou	55
6.	DYN3D IWQS = 24 library generation using Monte Carlo code SERPENT for VVER I.V. Rudziankou, L.F.Babichev	61
7.	Influence of Magnetic Field on Electron States in Circular Quantum Dot in the Presence of Rashba and Dresselhaus Spin-Orbit Interactions of Equal Strengths A.V. Baran, V.V. Kudryashov	66
8.	The (g-2) _μ Anomaly Within the Left-Right Symmetric Model O.M. Boyarkin, G.G. Boyarkina, V.V. Makhnach, D.S. Vasileuskaya	74
9.	Nonlinear processes of degradation of structural elements of nuclear power facilities and their aging management based on intelligent sensors nets and neural network technologies	
	G.Ya. Buymistriuk	83
10.	Leptonic Decay Widths for the Composite System of Two Spin Particles with Equal Masses in the Relativistic Quasipotential Approach	00
	Yu.D. Chernichenko, L.P. Kaptari	92
11.	Influence of the Metasurface Structural Characteristics on its Optical Properties S N. Dovydenko	104
12	Technologies in Computer Comes: A Thought Experiment	101
12.	N. V. Efimova, Y. I. Zheshka	109
13.	Угловая зависимость переданной протону поляризации в процессе <i>ер</i> → <i>ер</i> М.В. Галынский	115

14.	Electromagnetic Field of a Point Charge in the Vicinity of Black Hole	125
	S. Kolhalov, A. Goldatslevich, G. velesnehagin, A. Galkun	123
15.	Informational Approach to Probabilistic Distribution Function Identification of the Sample of Radionuclide Concentrations Measurements in Radioactive Waste Characterization Practice N. Harbachova, N. Kulich, N. Kuzmina, S. Yatsko, J. Korchova	132
16.	Semileptonic Decay of Mesons in Point Form of Poincaré-Invariant Quantum Mechanics	140
1 7	V.Yu. Haurysh, V.V. Andreev	140
17.	Определение напряженно-деформированного состояния материала зондовым наноиндентированием и дифракцией нейтронов С.А. Чижик, М.Л. Хейфец, В.Л. Венгринович, Д.А. Винтов, В.Т. Эм, И.В. Карпов	149
18.	Оптимизация структуры и повышение эффективности управления интегрированной системы менеджмента качества А.Е. Дайнеко, А.С. Гаркун, М.Л. Хейфец, Е.Н. Якутович, Г.В. Подгорный, В.Е. Шолоник	157
19.	Collective Phenomena in pp Interactions with High Multiplicity N. Barlykov, V. Dudin, E. Kokoulina, A. Kutov, V. Nikitin, V. Popov, R. Shulyakovsky	169
20.	Geometrization of Quantum-Mechanical Problem for Dirac Particle in the Newman-Unti-Tamburino Space-Time Nina Krylova, Victor Red'kov	173
21.	Main Trends in Modern Prosthetic Dentistry A.V. Kuvshinov	181
22.	On the Disposal of Very Low-Level, Low-Level and Short-Lived Inter- mediate-Level Radioactive Waste of the Belarusian NPP M. Zhemzhurov, N. Kuzmina	188
23.	How the Periodic Table of Fullerenes was born A.I. Melker, M.A. Krupina	200
24.	Probabilistic Safety Analysis of the Large LOCA Accident in the VVER- Reactor Plant E. Mikhalycheva, K Artemyeva	210
25.	Моделирование Распространения Многокомпонентных Потоков Газов и Радиоактивных Аэрозолей в Отдельных Помещениях	
	Контайнмента И.О. Мороз, А.Г. Трифонов	219

26.	Simulation of Radioactive Aerosol Particle Coprecipitation with Droplet Structures	220
27.	Updated Constraints on Heavy Resonances Using the RUN 2 Data at	229
	LHC A.A. Pankov, I.A. Serenkova and V.A. Bednyakov	237
28.	Spin 1 particle with anomalous magnetic and electric quadruple moments in presence of external uniform electric field, Cartesian coordinates A.V. Ivashkevich	245
29.	Spin 1 particle with electric quadruple moment in external electric field, solutions with cylindric symmetry A.V. Ivashkevich	262
30.	Stuckelberg Particle in External Magnetic Field, and the Method of	
	E.M. Ovsiyuk, A.P. Safronov, A.V. Ivashkevich, O.A. Semenyuk	278
31.	Spin 2 Particle, Cylindric Symmetry, Projective Operator Method, External Magnetic Field	
	A.V. Ivashkevich, O.A. Semenyuk, E.M. Ovsiyuk, A.V. Bury, V.V. Kisel, V.M. Red'kov	302
32.	Spin 2 massless particle, cylindric symmetry, projective operators, gauge	
	A.V. Ivashkevich, O.A. Semenyuk, E.M. Ovsiyuk, A.V. Bury, V.V. Kisel, V.M. Red'kov	342
33.	Generalization of the Discrete Spectral Method for the Semi-classical Rabi Problem: Periodic and Non-Periodic Dynamics of Level Populations of Quantum Systems S. Baniak, V. Savya	375
34.	Measuring Cantor Set and Erdős conjecture on arithmetic progressions	570
	Natalya V. Maygula, Praskovya D. Serowa, Ivan A. Kovalew, Dmitry W. Serow	382
35.	To the problem of the contribution of spin-polarized protons to Baryshevsky–Luboshits effect	206
36.	Free motion of a quantum particle in the Gaussian space	380
	N.D. Shaikovskaya	391
37.	The Quantum Primordial Black Holes and Some Cosmological Parameters Alexander Shalvt-Margolin	400
38.	Investigation of the Exact Static Spherically Symmetric Solution in the	
	Term of 5-dimensional Projective Unified Field Theory (PUFT) Alexey Shaplov, Alexander Gorbatsievich	410

39.	Свойства поверхности оксидных материалов на основе хрома(III) и цинка(II), полученных соосаждением из растворов Е.А. Шапорова	419
40.	The Mellin-Barnes technique and exact form of the three bubble-diagram contributions to the lepton anomaly Leonid Kaptari, Vasil Lashkevich and Olga Solovtsova	431
41.	Nuclear knowledge management in the Republic of Belarus S. Sytova, S. Charapitsa, A. Kavalenka, A. Dunets, V. Haurilavets	440
42.	The Polarization of the Valence Quarks and the Strange Sea in the Neutrino Experiments on the Polarized Deuterons E.S. Timoshin and S.I. Timoshin	450
43.	Анализ условий возникновения парогазовых взрывов в реакторных установках АЭС на основе детерминистического подхода А.А. Тищенко, А.Г. Трифонов	455
44.	Nonlinear Dynamics of Arterial Blood Pressure Variability M.V. Voitikova	462
45.	Linear Skorokhod SDE and Approximations of its Expectations Alexander Egorov and Anatoly Zherelo	471
46.	Моделирование Стационарных Состояний Теплоносителя в Первом Контуре ВВЭР-1200 Энергоблока № 1 Белорусской АЭС с помощью Кода АТНLЕТ.	
	В.А. Шапоров, Е.А. Шапорова	

Научное издание

Nonlinear Dynamics and Applications : Proceedings of the Twenty nine Anniversary Seminar NPCS'2022, Minsk, June 21-24, 2022 = Нелинейная динамика и приложения : труды XXIX Международного семинара, Минск, 21-24 июня 2022 г.

Технический редактор В.Г. Гавриленко

Подписано в печать 22.09.2022 Формат 60х84_{1/8} Бумага офсетная Печать цифровая Усл.печ.л. 60,6 Уч.изд.л. 60,9 Тираж 100 экз. Заказ 5132 ИООО «Право и экономика» 220072 Минск Сурганова 1, корп. 2 Тел. 8 029 684 18 66 Отпечатано на издательской системе Gestetner в ИООО «Право и экономика» Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий, выданное Министерством информации Республики Беларусь 17 февраля 2014 г. в качестве издателя печатных изданий за № 1/185

