

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОДСИСТЕМ СУЗ РЕАКТОРА РБМК-1000 ПЕРВОГО БЛОКА СМОЛЕНСКОЙ АЭС

С.В. Соколов

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



В работе рассматривается метод вероятностного оценивания среднего прямого остаточного времени (остаточного ресурса) для электрооборудования АЭС. Представлена математическая модель расчета данной характеристики надежности для восстанавливаемых технических систем. Приведены результаты вычислений математического ожидания прямого остаточного времени для подсистем СУЗ Смоленской АЭС. В качестве исходных данных использовалась статистическая информация об отказах оборудования СУЗ реактора РБМК-1000 блока № 1 Смоленской АЭС.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в России функционируют десять атомных электростанций (АЭС), энергоблоки которых поставляют как на внутренний, так и на внешний рынки около 17% от общего числа всей производимой у нас энергии.

В рамках реализации Программы развития атомной энергетики Российской Федерации на 1998–2005 гг. и на период до 2010 г. наблюдаются тенденции к расширению производства. Так в 2001 г. введен в эксплуатацию энергоблок № 1 Волгодонской АЭС, а в 2004 г. приступил к работе энергоблок № 3 Калининской АЭС, а также началось строительство перспективного реактора БН-800 на Белоярской АЭС. Кроме этого, планируется к 2020 г. принять в эксплуатацию пятый энергоблок БАЭС с коммерческим реактором БН-1800, проектирование которого ведется в настоящее время. Однако, по-прежнему, остаются актуальными проблемы, связанные с эксплуатацией ныне действующих энергоблоков. Повышенное внимание уделяется вопросам анализа надежности и безопасности оборудования. Связано это с тем, что на данный момент большое количество энергоблоков находится на грани исчерпания назначенного ресурса. Но практика эксплуатации показывает, что как отдельные системы ядерных энергетических установок (ЯЭУ), так и энергоблоки АЭС в целом имеют еще достаточный запас ресурса. Программа развития атомной энергетики предусматривает продолжение эксплуатации энергоблоков АЭС после окончания 30-летнего срока службы за счет выполнения ряда работ, обеспечивающих безопасность дальнейшего их функционирования за пределами ранее назначенного срока службы. Реализация обширного комплекса мероприятий по модернизации АЭС с использованием новых технологий и современ-

ного оборудования позволяет обеспечить дальнейшую безопасную эксплуатацию АЭС, добиться увеличения коэффициента использования установленной мощности (КИУМ), а также обеспечить выполнение необходимых условий для продления срока эксплуатации энергоблоков АЭС.

Для продления сроков эксплуатации энергоблоков атомными станциями совместно с организациями, обеспечивающими поддержку эксплуатации энергоблоков, разрабатываются программы по управлению ресурсными характеристиками оборудования, важного для безопасности, и поддержанию остаточного ресурса на требуемом уровне путем своевременного технического обслуживания, ремонта со стендовыми испытаниями и использования восстанавливаемого ЗИП. В результате внедрения программ управления ресурсом, проведения комиссионного обследования технического состояния оборудования, анализа вероятностных расчетов по определению показателей надежности и остаточного ресурса элементов и систем АЭС концерном «Росатом» принимаются решения о продлении установленного срока эксплуатации энергоблоков.

Вопросам вероятностного оценивания остаточного ресурса оборудования АЭС и посвящена данная статья.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время в большинстве случаев при проведении вероятностного анализа характеристик надежности используют так называемую простейшую модель ремонта: после каждого отказа система приводится в исправное состояние за пренебрежимо короткое время и сразу же возвращается в рабочее состояние. Эта модель представляет собой хорошее приближение прежде всего для той практической ситуации, когда имеются резервные системы одного типа (такие как заменяемые блоки, запасные части), причем приведение в исправное состояние означает полную замену отказавшей системы или мгновенное переключение на резервный канал.

Однако функционирование современных технических систем, как правило, представляет собой более сложный процесс, для которого характерно наличие периодического или постоянного контроля неисправностей, схем обнаружения отказов, проведения аварийно-восстановительных работ и т.д.

Кроме этого следует отметить, что когда речь идет об оценке или прогнозировании остаточного ресурса, в основном, все сводится не к расчетам характеристик долговечности, а к анализу показателей надежности, таких как интенсивность отказов, вероятность безотказной работы (ВБР), коэффициент готовности, и по результатам делается вывод о техническом состоянии объекта.

Для проведения более точного исследования ресурса оборудования возникает необходимость разработки методики оценивания именно характеристик долговечности. Также необходимо учитывать особенности и режимы функционирования объектов, которые, как показывает опыт эксплуатации, могут существенно влиять на долговечность.

ОЦЕНКА ПРЯМОГО ОСТАТОЧНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ СИСТЕМ

Как известно, в современных технических системах используются различные средства контроля исправности оборудования. Своевременное обнаружение отказов и дефектов позволяет оперативно проводить мероприятия по их устранению и, следовательно, более эффективно эксплуатировать технические объекты. В данной работе мы будем исследовать системы, для которых характерно наличие

элементов контроля неисправностей без обнаружения места отказа, т.е. в случае отказа некоторой подсистемы оперативному персоналу незамедлительно становится об этом известно (например, срабатывает аварийная индикация), однако какой именно элемент подсистемы отказал, неизвестно.

Рассмотрим модель анализа надежности такой системы, учитывающую наличие постоянного контроля без обнаружения места отказа и проведение аварийного восстановления в случае отказа.

Опишем модель функционирования системы. В момент начала работы $t_0=0$ система находится в работоспособном состоянии, и контроль осуществляется в системе постоянно. В случае установления факта отказа объекта начинается процесс обнаружения места отказа. Нароботка до отказа объекта ξ_i , моменты отказов τ_i , длительность процесса обнаружения отказавшего элемента η_{Si} – случайные величины. После идентификации места отказа происходит восстановление системы в течение случайного времени η_{ri} . После восстановления объект продолжает свою работу до очередного момента отказа, далее вновь происходят идентификация места отказа, восстановление системы и переход в работоспособное состояние. Такой цикл повторяется до назначенного момента времени t . Моменты восстановления системы обозначим как s_i . Представленная стратегия отображена на рис. 1. Следует отметить, что в рассматриваемой модели схема контроля неисправностей принимается как высоконадежная система, отказы которой крайне редки, и ими можно пренебречь.

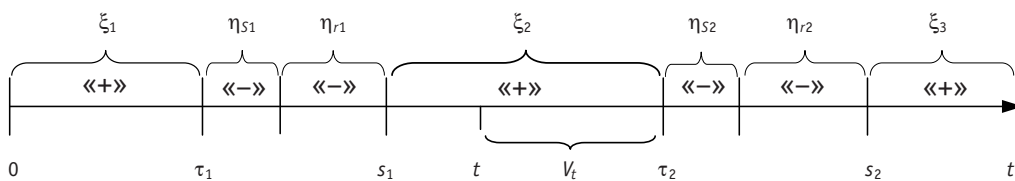


Рис. 1. Стратегия функционирования объекта, учитывающая встроенный контроль с последующей идентификацией места отказа

На рисунке 1 области, отмеченные знаком «+», характеризуют работоспособное состояние системы, а знаком «-» – неработоспособное. Величины τ_i и s_i обозначают интервалы времени от начала работы системы до i -го отказа и i -го восстановления соответственно. Их можно представить в виде сумм других случайных величин:

$$\tau_i = s_{i-1} + \xi_i; \quad s_i = s_{i-1} + \xi_i + \eta_{Si} + \eta_{ri}. \quad (1)$$

Пусть V_t – прямое остаточное время, или остаточная наработка работающей системы к моменту времени t (см. рис. 1).

Учитывая, что ξ_i – независимые одинаково распределенные случайные величины, функцию распределения $V_t(x) = P(V_t \leq x)$ для прямого остаточного времени можно вычислить по формуле полной вероятности [1]

$$\begin{aligned} V_t(x) &= \sum_{i=0}^{\infty} P(s_i < t < s_i + \xi_{i+1} \leq t + x) = \\ &= F_{\xi}(t+x) - F_{\xi}(t) + \int_0^t [F_{\xi}(t+x-u) - F_{\xi}(t-u)] h(u) du, \end{aligned} \quad (2)$$

где $F_{\xi}(t)$ и $F_{Si}(t)$ – функции распределения соответственно наработки до отказа ξ и моментов восстановления s_i , а $h(t)$ – плотность восстановления [1], которую можно определить, решая интегральное уравнение Вольтерра второго рода:

$$h(t) = \int_0^t f_{\xi}(u) \int_0^{t-u} f_{\eta_s}(t-u-v) f_{\eta_r}(v) dv du + \int_0^t h(x) \int_0^{t-x} f_{\xi}(u) \int_0^{t-x-u} f_{\eta_s}(t-x-u-v) f_{\eta_r}(v) dv du dx. \quad (3)$$

Здесь $f_{hs}(t)$ и $f_r(t)$ – плотности распределения случайных величин η_{Si} и η_{ri} .

Найдем среднее прямое остаточное время $MV_t(t)$ как математическое ожидание оставшегося времени работы системы до очередного отказа, начиная с момента времени t , в который система была работоспособна:

$$MV_t(t) = M \sum_{i=0}^{\infty} (\tau_{i+1} - t) \cdot I\{s_i \leq t < \tau_{i+1}\}, \quad (4)$$

где s_i и τ_i – моменты i -го восстановления и i -го отказа, определяются согласно (1), тогда

$$MV_t(t) = \sum_{i=0}^{\infty} M(s_i + \xi_{i+1} - t) \cdot I\{s_i \leq t < s_i + \xi_{i+1}\} = \sum_{i=0}^{\infty} \psi_i(t), \quad (5)$$

где $\psi_i(t)$ согласно определению математического ожидания равно

$$\psi_i(t) = \int_0^{\infty} x dx \int_0^t f_{\xi}(x+t-s) f_{s_i}(s) ds = \int_0^{\infty} x \phi_i(t; x) dx.$$

Выполнив преобразования Лапласа внутреннего интеграла для $\psi_i(t)$, получим

$$\bar{\psi}_i(p) = (\bar{f}_{\xi}(p) \cdot \bar{f}_{\eta_s}(p) \cdot \bar{f}_{\eta_r}(p))^i \int_0^{\infty} x \bar{g}(p; x) dx, \quad (6)$$

где $\bar{g}(p; x)$ – образ функции $g(t; x) = f_{\xi}(t+x)$.

Тогда, с учетом (5) и (6), изображение по Лапласу для функции среднего прямого остаточного времени $\overline{MV}_t(p)$ будет определяться выражением

$$\begin{aligned} \overline{MV}_t(p) &= \sum_{i=0}^{\infty} (\bar{f}_{\xi}(p) \cdot \bar{f}_{\eta_s}(p) \cdot \bar{f}_{\eta_r}(p))^i \int_0^{\infty} x \bar{g}(p; x) dx = \\ &= \frac{1}{1 - \bar{f}_{\xi}(p) \cdot \bar{f}_{\eta_s}(p) \cdot \bar{f}_{\eta_r}(p)} \int_0^{\infty} x \bar{g}(p; x) dx. \end{aligned}$$

Перейдя к оригиналам, получим интегральное уравнение Вольтерра второго рода

$$MV_t(t) = \int_0^{\infty} x f_{\xi}(t+x) dx + \int_0^t MV_t(x) \int_0^{t-x} f_{\xi}(x) \int_0^{t-x-y} f_{\eta_s}(y) f_{\eta_r}(t-x-y-z) dz dy dx, \quad (7)$$

решая которое, можно оценить математическое ожидание прямого остаточного времени MV_t .

Представленную методику расчета прямого остаточного времени можно использовать при решении задач оценки остаточного ресурса как технических систем в целом, так и отдельных составляющих элементов. Далее рассматриваются возможности практического применения данного метода на примере расчета ресурсных характеристик системы управления и защиты (СУЗ) реактора РБМК-1000 первого энергоблока Смоленской АЭС.

РАСЧЕТ ПРЯМОГО ОСТАТОЧНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ПОДСИСТЕМ СУЗ

СУЗ реактора РБМК-1000 предназначена для выполнения функций по защите реактора и энергоблока в целом при возникновении отклонений параметров от

заданных значений или преднамеренном формировании команд разгрузки и останова энергоблока. Для решения всех задач, возложенных на СУЗ, система выполнена по принципам многоканальности построения измерительной части, многоканальной обработки информации с контролем исправности каналов и использованием надежных критериев достоверности и резервирования по питанию всех элементов системы. При отказах (отключениях приборов) в любом из каналов измерительной или логической части автоматически формируется аварийный сигнал.

В рамках данной работы расчеты остаточного ресурса были выполнены для четырех основных схем аварийной защиты (АЗ): аварийная защита по скорости в пусковом (АЗСМ) и основном диапазонах (АЗСР), аварийная защита по превышению мощности в пусковом (АЗММ) и в основном диапазонах (АЗМР).

Рассмотрим пример расчета среднего прямого остаточного времени для канала АЗСР. На основании анализа структурно-функциональной схемы канала АЗСР можно построить схему надежности данного канала АЗ (рис. 2) и по ней выполнить построение логических функций работоспособности (ЛФР). АЗСР состоит из трех каналов, соединенных по схеме «Логика 2 из 3-х». В состав каждого канала входят датчик (компенсационная нейтронная камера КНК), блок питания камеры (БП), устройство выработки сигнала (УВС). Аварийные сигналы в канале формируются при любой из следующих причин: превышение скорости разгона реактора; неисправность (выключение) УВС; неисправность блока питания камеры (БП) либо его отключение. Следовательно, выход из строя одного из элементов канала приводит к его неработоспособности в целом. Отказ схемы контроля «Логика 3-или» также приводит к отказу канала АЗ.

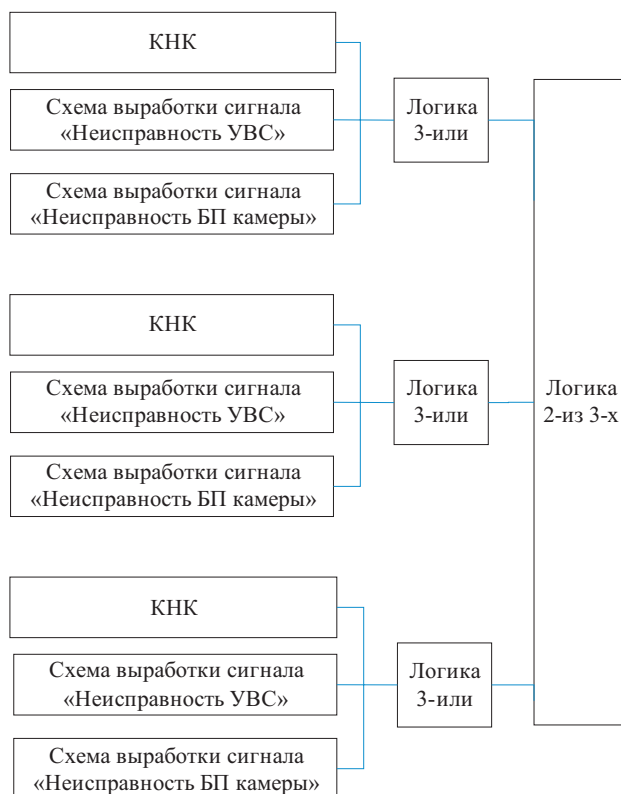


Рис. 2. Схема надежности канала аварийной защиты по скорости нарастания мощности реактора в рабочем диапазоне (АЗСР)

ВБР канала АЗСР определяются как

$$P_1 = P_{\text{БП}} \cdot P_{\text{КНК}} \cdot P_{\text{УВС}},$$

$$P_k = P_1 \cdot P_{3\text{-или}} \quad (8)$$

$$P_{\text{АЗСР}} = P_{2 \text{ из } 3} \cdot (3 \cdot P_k^2 - 2 \cdot P_k^3).$$

где $P_{\text{БП}}$, $P_{\text{КНК}}$ и $P_{\text{УВС}}$ – вероятности безотказной работы БП, КНК и УВС соответственно, а $P_{2 \text{ из } 3}$, $P_{3\text{-или}}$ – ВБР элементов логики.

Важным моментом в работе является решение задачи оценивания характеристик надежности комплектующих элементов. В силу особенностей сбора данных об отказах оборудования на российских АЭС, для исследования доступна лишь информация об общем количестве отказов однотипных устройств, сгруппированная по годам эксплуатации. В [2] представлена методика обработки исходной информации такого вида, в основе которой лежит метод ядерного оценивания. Используя данный математический аппарат, можно получить зависимость параметра потока отказов от времени эксплуатации системы и далее оценить плотность распределения наработки до отказа и ВБР. Расчеты были выполнены с использованием статистических данных об отказах оборудования первого энергоблока СМАЭС, полученных с 1990 по 2007 гг.

Используя выражения (8) и аппарат теории надежности, можно определить вероятностные характеристики надежности системы АЗСР [3], в том числе и плотность распределения $f_c(t)$ наработки до отказа системы, которая необходима для вычисления математического ожидания прямого остаточного времени. Аналогичным образом были проведены расчеты характеристик надежности составляющих

элементов и систем в целом для АЗСМ, АЗМР, АЗММ. Полученные зависимости плотности распределения и ВБР для систем АЗ представлены на рис. 3.

Подставив полученные характеристики в уравнение (7) и решив его, можно найти зависимости математического ожидания прямого остаточного времени от времени работы системы. При расчетах считалось, что распределение времени обнаружения отказа и времени восстановления работоспособности элемента подчиняется нормальному усеченному (слева) закону. Параметры законов распределения представлены в табл. 1. Результаты расчетов среднего прямого остаточного времени для систем АЗ представлены на рис. 4.

Результаты расчетов показывают, что оборудование СУЗ

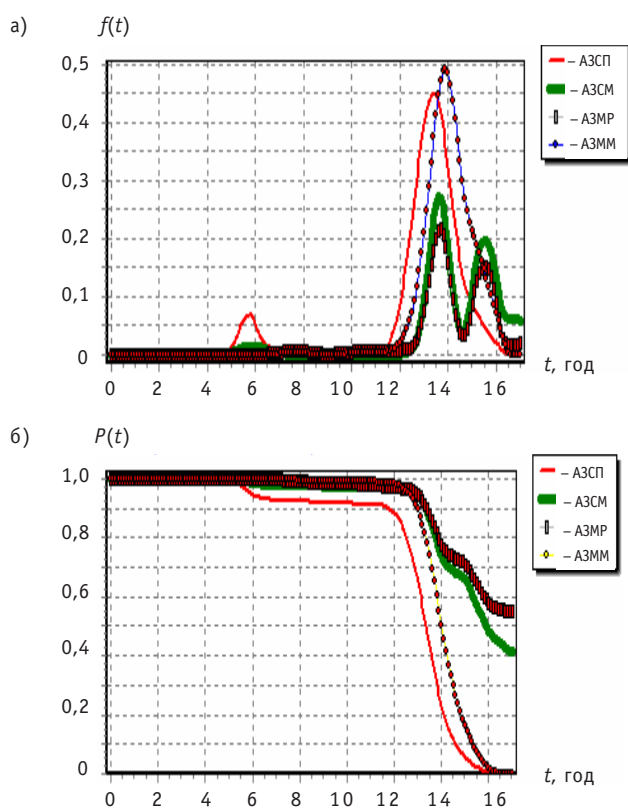


Рис. 3. Плотность распределения наработки (а) и ВБР систем АЗ (б)

Таблица 1

Параметры законов распределения

Случайная величина	Математическое ожидание m , ч	Среднеквадратичное отклонение σ , ч
η_{sf}	8	2
η_{ri}	24	8

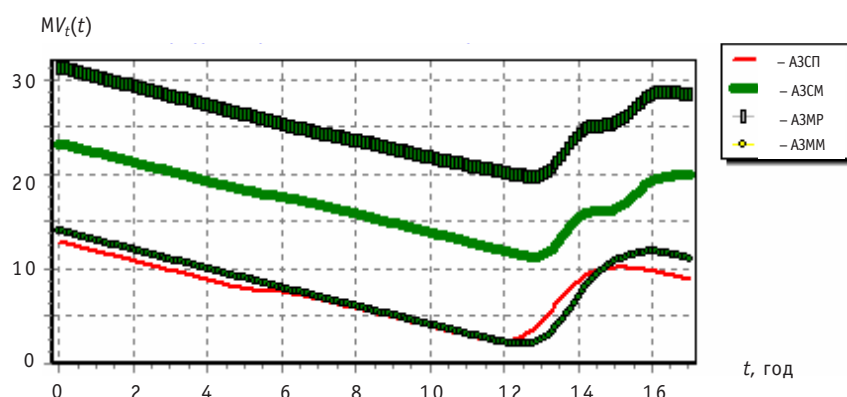


Рис. 4. Зависимость среднего прямого остаточного времени для системы АЗСП, АЗСМ, АЗММ, АЗМР

реактора РБМК-1000 первого энергоблока Смоленской АЭС обладает еще достаточным ресурсом. Среднее прямое остаточное время – это математическое ожидание времени, оставшегося до отказа, если «инспектируется» исследуемый объект в момент времени t . Из анализа полученных зависимостей видно, что наименьшим ресурсом обладает оборудование системы АЗСП, однако значение математического ожидания прямого остаточного времени на 17-й год эксплуатации составило примерно 10 лет. Таким образом, мы можем говорить о еще достаточном запасе ресурса для этой системы.

Следует отметить, что результаты расчетов являются оценочными. К ним надо относиться осторожно, поскольку они получены на основании статистической информации малого объема. При поступлении новой информации результаты будут изменяться и уточняться. Поэтому работы по анализу характеристик надежности и оценке остаточного ресурса необходимо проводить периодически, скажем раз в год, и особенно после проведения любых работ по модернизации, реконструкции и усовершенствованию оборудования СУЗ.

Литература

1. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. – М.: Радио и связь, 1988. – 357 с.
2. Чепурко В. А. Ядерная оценка параметра потока отказов. Диагностика и прогнозирование состояния сложных систем. Сборник научных трудов № 15 кафедры АСУ. – Обнинск: ИАТЭ, 2004. – 80 с.
3. Антонов А. В., Острейковский В. А. Оценивание характеристик надежности элементов и систем ЯЭУ комбинированными методами. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 368 с.

Поступила в редакцию 1.06.2009

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.58

Operational Reliability Statistical Analysis of Reactors VVER-1000 Electropump Units CN 60-180 by Kernel Estimation Methods \ A.V. Antonov, V.A. Chepurko, N.G. Zulyaeva, A.Y. Belousov, V.V. Taratunin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 10 pages, 1 table, 7 illustrations. – References, 15 titles.

The paper considers questions of processing of the statistical information on pump aggregates CN 60-180 failures during operation. Pump units CN 60-180 are part of the regular equipment of reactors VVR-1000. The information for the analysis is obtained from branch database VNIIAES. The object operation observation period is 01.01.1990–31.12.2007. To processing the statistical information the nonparametric estimation method named kernel estimation was applied. Such pump units reliability characteristic estimates, as operating time to failure probability density and distribution function, probability of non-failure operation and hazard rate are obtained. The work results are used for acceptance of managing influences.

УДК 621.039.586

Support System of Emergency Actions Management for the NPP with a BN-Type Reactor \ Y.M. Volkov, A.I. Voropaev, S.T. Leskin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 2 illustrations. – References, 16 titles.

In article described the status of development and the content of a software-technical complex for emergency actions support for BN-type reactors. It represents a system of interconnected mathematical models, techniques, technical and software means. The considered complex is developed at the Institute of Physics and Power Engineering (IPPE) and represents a system for support of emergency actions management for reactors of BN-type.

УДК 543.272.2: 543.25

Elektrokonduktometricheskoye Gs-Analyzers of Hydrogen: Long-Term Operating Experience \ E.A. Kochetkova, V.V. Leshkov, V.P. Kornilov, S.G. Kalyakin, A.V. Drobishev, S.N. Skomorokhova, S.V. Bogdanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 4 tables, 5 illustrations. – References, 9 titles.

The article presents the results of the development and long-term operating experience of electrokonduktometricheskoye gas-analyzers of hydrogen. Technical characteristics and employment examples for several variants of devices, type AV and SOV, are resulted. Gas-analyzers of hydrogen destined for continuous automatic measurement of a volume fraction of hydrogen in gas environments: He, Ar, N₂, protective atmospheres of research and industrial installations, as well for air environments with reference to hydrogen safety on the atomic power station. The presented variants of gas-analyzers of hydrogen are united uniform by an elektrokonduktometricheskoye action principle.

УДК 621.039.53: 620.179.152

Automated Result Analysis in Radiographic Testing of NPPs' Welded Joints \ A.O. Skomorokhov, A.V. Nakhabov, P.A. Belousov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 8 illustrations. – References, 10 titles.

The paper describes development of algorithms for automated radiographic image interpretation, which based on modern data analysis methods. Only images for welded joints are considered yet. The paper covers automatic image segmentation, object recognition and defect detection issues. Testing results for actual radiographic images with wide parameter variation are presented as well.

УДК 621.039.58

The Residual Lifetime Estimation for the RBMK-1000 PCS of the Smolensk NPP's First Power Unit \ S.V. Sokolov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 7 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 3 titles.

In the paper the method of residual lifetime estimation for nuclear power plants' (NPP) electrical equipment are considered. The mathematical model of the reliability characteristics calculation for the protection control system is given. The results of the residual lifetime calculations for the PCS's subsystem are represented in the paper. As a basis for calculation the statistical data about failures of the RBMK-1000 protection control system