

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 658.562.64

С. И. Торгашин, А. А. Папко, Е. А. Полякова

ОБ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ СЕЙСМОДАТЧИКОВ СИСТЕМ АВАРИЙНОЙ ЗАЩИТЫ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

S. I. Torgashin, A. A. Papko, E. A. Polyakova

QUALITY AND RELIABILITY EVALUATION OF SEISMIC SENSORS FOR EMERGENCY PROTECTION SYSTEMS OF REACTOR FACILITIES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. С целью защиты атомных электростанций (АЭС) от воздействия сейсмических колебаний внешней поверхности Земли согласно рекомендациям Международного агентства по атомной энергии на АЭС должна применяться аппаратура антисейсмической защиты реакторных установок. В настоящее время актуальным решением повышения безопасности при эксплуатации АЭС является применение сейсмоматчиков типа СД 4 разработки и производства АО «НИИФИ» с повышенными техническими требованиями к качеству и надежности. С целью оценки соответствия безотказности сейсмоматчика заданным требованиям технического задания целесообразно проведение расчета надежности, который позволит получить оценку соответствия показателей надежности до получения экспериментальных данных. **Материалы и методы.** Сейсмоматчик является сложной многоканальной системой, не имеющей отечественных и зарубежных аналогов по показателям безотказности. С целью непрерывного мониторинга проекций вектора сейсмоускорения в системе формируются отдельные аналоговые сигналы и информация о модуле измеренного вектора сейсмоускорения. Расчетный метод подтверждения безотказности учитывает различия структуры системы по каждой из выполняемых функций и реализует функцию автоматического контроля исправности, периодичность которого позволит прогнозировать безопасность интервалами времени, необходимыми для достижения установленных показателей, в чем и заключается его оригинальность. **Результаты.** Для выполнения расчета проведены качественный анализ надежности датчика, в результате которого определены состав и структура датчика, границы датчика, описаны критерии отказа и неисправности датчика и количественный анализ надежности. В результате анализа признана необходимость реализации в сейсмоматчике функции «контроль исправности», обеспечивающей периодическое автоматическое определение исправности измерительных трактов на протяжении всего жизненного цикла датчика. В результате расчета надежности путем прогнозирования интенсивностей отказов электрорадиоизделий, примененных в датчике, определены количественные значения

показателей его безотказности. **Выводы.** Достигнутые расчетным путем показатели надежности сейсмодатчика соответствуют требованиям нормативной документации и обеспечивают надежную работу датчика с выполнением его функций. Проведенный расчет значительно сокращает время на получение результатов оценки показателей безотказности на данном этапе разработки и позволяет спрогнозировать надежность без проведения эксперимента.

A b s t r a c t. Background. For the purpose of nuclear power plants (NPP) protection from ground surface borne vibrations, according to International Atomic Energy Agency (IAEA) recommendations, NPP must be equipped with anti-seismic protection instrumentation for reactor facilities. Nowadays the up-to-date solution for NPP safety enhancement is the usage of seismic sensors SD 4 of "NIIFI" JSC development and production with increased quality performance specifications of quality of reliability. To provide evaluation of conformity seismic sensor's reliability to specified technical requirements it is appropriate to perform reliability calculation that provides evaluation of reliability numbers conformity prior to experimental and measurement data. **Materials and methods.** The seismic sensor is a complex multichannel system; in terms of reliability it has no home-produced or international alternative sensors. To provide continuous monitoring of seismic load vector projection, separate analog signals and data on the module of measured seismic load vector are generated within the system. Computational method of reliability confirmation accounts for differences in system structure under each performed function and in intervals performs built-in check that provides safety forecasting by time intervals needed for reaching the specified values, wherein lies the method's originality. **Results.** For the purpose of computation qualitative analysis of sensor reliability has been carried out; as a result of which, sensor components, structure and limits have been defined, sensor failure and fault criteria have been described, as well as numerical reliability analysis. As follows from the analysis it is necessary to implement in the seismic sensor such function as «built-in check» which provides repetitive automatic detection of measuring routes state-of-health throughout the sensor operating life cycle. As a result of reliability calculation using failure rate forecasting for sensor electronic components, quantitative values of sensor reliability index have been defined. **Conclusions.** Calculated reliability index of the seismic sensor complies with the requirements of the reference documentation and guarantees the sensor reliable operation with full functions performing. The carried out calculation considerably cuts the time needed to obtain the results of reliability index evaluation at this development phase and allows to forecast reliability without experiment performance.

К л ю ч е в ы е с л о в а: аппаратура антисейсмической защиты реакторных установок, сейсмодатчик, качественный анализ надежности, расчет надежности.

Key words: anti-seismic protection systems for reactor facilities, seismic sensor, reliability qualitative analysis, reliability calculation.

Глобальной задачей проектирования и эксплуатации атомных электростанций (АЭС) является обеспечение гарантий сохранения их ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации.

Одну из наиболее значимых угроз для безопасности АЭС представляют землетрясения и сейсмические колебания внешней поверхности Земли. Для обеспечения защиты АЭС от их воздействия согласно рекомендациям Международного агентства по атомной энергии на всех АЭС мира должна применяться аппаратура антисейсмической защиты реакторных установок [1], к качеству и надежности которой предъявляются повышенные технические требования.

В настоящее время актуальным решением повышения безопасности при эксплуатации АЭС является применение сейсмодатчиков типа СД 4 разработки и производства АО «НИИФИ», которые устанавливаются на фундаменты помещений в зоне реакторных установок. СД 4 по сути является сложной многоканальной системой и не имеет отечественных и зару-

бежных аналогов по таким показателям безотказности, как средняя наработка до отказа – не менее 250 000 ч, вероятность невыполнения функции аварийной защиты на требование при действии аварийного значения сейсмоускорения (ситуация «пропуск события») – не более $1 \cdot 10^{-6}$, вероятность ложного срабатывания по функции аварийной защиты – не более $1 \cdot 10^{-6}$ и параметр потока отказов при выполнении функции контроля и регистрации – не более $2 \cdot 10^{-5}$ 1/ч.

Единственным реализуемым способом подтверждения перечисленных показателей безотказности на стадиях разработки и производства является предложенный авторами расчетный метод, оригинальность которого состоит в учете различий структуры системы по каждой из выполняемых функций и реализации функции автоматического контроля исправности, периодичность которого позволит прогнозировать безопасность интервалами времени, необходимыми для достижения установленных показателей.

СД 4 предназначен для непрерывной регистрации сейсмических воздействий на реакторную установку атомной электростанции. В нем формируются дискретные предупредительные и аварийные сигналы превышения установленных уровней сейсмического воздействия, которые передаются в аппаратуру отображения и протоколирования, и дискретный сигнал о состоянии исправности датчика, передаваемый в аппаратуру сигнализации первопричины. Кроме этого, сейсмодатчик с целью непрерывного мониторинга проекций вектора сейсмоускорения на ортогональные оси X , Y , Z , связанные с установочной плоскостью датчика, формирует отдельные аналоговые сигналы и информацию о модуле измеренного вектора сейсмоускорения.

Для выполнения расчета проведем качественный и количественный анализ надежности СД 4. Качественный анализ надежности включает в себя определение состава и структуры датчика, границ датчика, а также описание его критериев отказа и неисправности.

Согласно [2] СД 4 содержит три акселерометра (сейсмоприемника), установленных на специальной платформе по трем ортогональным осям X , Y , Z , которые предназначены для измерения проекций вектора сейсмоускорения, а также три измерительных канала. Измерительные каналы предусматривают, в зависимости от конкретного требования к порогу срабатывания, возможность ослабления или усиления выходных сигналов акселерометров и последующего их возведения в квадрат. Нагрузкой измерительных каналов является суммирующий усилитель, выходной сигнал которого подается на извлекатель корня и далее на компараторы, настроенные на заданные пороги срабатывания. Компараторы управляют работой одновибраторов, которые формируют одиночные импульсы заданной амплитуды и длительности. Через элементы гальванической развязки импульсы передаются в регистратор и в систему защиты. В датчике предусмотрены возможность автоматического контроля исправности с периодичностью (11 ± 2) мин на протяжении всего жизненного цикла и возможность калибровки от внешнего источника.

Границами датчика являются: вектор поля сейсмоускорения (по входу для функций формирования сигнала запуска регистратора и аварийного сигнала), разъем CALIBRATION (по функции калибровки) и по выходу – разъем, соединяющий СД 4 с аппаратурой отображения протоколирования и регистрации.

Рассмотрим возможные критерии отказа и неисправности датчика. Критериями отказа датчика по функциям предупредительной аварийной защиты являются, во-первых, функциональный отказ – отсутствие выходных сигналов аварийной защиты и сигналов запуска регистратора при наличии аварийной и предаварийной ситуаций и, во-вторых, ложное срабатывание – наличие выходных сигналов аварийной защиты и начала запуска регистратора при отсутствии аварийной и предаварийной ситуаций и отсутствие выходных сигналов датчика или их несоответствие заданным требованиям при проведении контроля исправности [3]. По способу обнаружения отказы делят на явные отказы, обнаруживаемые в момент их возникновения с помощью имеющихся технических средств (например, выполнение функции «контроль исправности») и скрытые отказы, обнаруживаемые при проведении калибровки при остановленной реакторной установке. При анализе характера и последствий отказов необходимо учитывать отказы, зависящие от условий работы и места расположения датчика, возникновения внутренних и внешних нештатных ситуаций и ошибок, допущенных в техническом задании, конструкторской документации, при изготовлении, а также от ошибок эксплуатирующего персонала.

С целью исключения возникновения перечисленных отказов необходимо размещать кабельные трассы по независимым помещениям или кабельным стеллажам, осуществлять питание датчика от надежной сети напряжения 220 В и учитывать возможность отключения одного из каналов при работающей реакторной установке для проведения калибровки.

При проведении количественной оценки показателей безотказности датчика необходимо получить оценку средней наработки до отказа T_0 , функциональной надежности (вероятности невыполнения функции защиты на требование – ситуация «пропуск события» $P_{\text{проп.АЗ}}$, вероятности ложного срабатывания $P_{\text{лож.АЗ}}$ и параметра потока отказов при выполнении функции контроля и регистрации ($\lambda_{\text{проп.ПЗ}}$ и $\lambda_{\text{лож.ПЗ}}$) и оценку вероятности невыполнения функции аварийной защиты на требование комплекта трех датчиков, соединенных по логике «2 из 3» $P_{\text{АЗ}}$.

Расчетная оценка показателей безотказности основана на вычислении этих показателей по справочным данным о безотказности электрорадиоизделий. Исходные данные для расчетов определены по [4]. Оценка показателей надежности датчика проводилась методом прогнозирования по надежности-функциональным схемам (НФС), составленным на основании анализа особенностей функционирования устройства в различных режимах его работы.

Для получения консервативной оценки, достаточной и необходимой для обеспечения заданных показателей надежности, возможны следующие допущения:

- для отдельных элементов принят экспоненциальный закон распределения наработки до отказа;
- интенсивности отказов отдельных элементов постоянны, не зависят от времени $\lambda(t) = \lambda$, а элементы прошли период приработки и не достигли периода старения;
- параметр потока отказов является стационарным одинарным потоком;
- интенсивность отказов и параметр потока отказов различаются;
- отказы отдельных элементов являются независимыми событиями.

Ниже представлены примеры расчета показателей надежности. Расчеты проведены в соответствии с требованиями [5].

Расчет средней наработки до отказа

При определении средней наработки до отказа принято условие, что на этот показатель влияют все элементы и узлы сейсmodатчика. Кроме этого, учтены результаты предварительного анализа, которые привели к необходимости реализации в сейсmodатчике функции «контроль исправности», с помощью которой периодически автоматически определяется исправность измерительных трактов на протяжении всего жизненного цикла изделия.

Средняя наработка до отказа (в ч) определяется по формуле

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i}, \quad (1)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -типа изделий (электро-радиоизделий и узлов), 1/ч; N_i – количество элементов i -типа в изделии; m – количество типов, используемых в датчике изделий.

Интенсивность отказов λ_i определяется как

$$\lambda_i = \lambda_{\delta} K_p K_{\text{э}} K_{\text{пр}} K_y \prod_{i=1}^n K_{\text{шгр}}, \quad (2)$$

или

$$\lambda_i = \lambda_{\text{бсг}} K_p K_{\text{э}} K_{\text{пр}} K_y \prod_{i=1}^n K_{\text{шгр}}, \quad (3)$$

где λ_{δ} – интенсивность отказов данного типа изделий, 1/ч; $\lambda_{\text{бсг}}$ – интенсивность отказов данной группы (подгруппы) изделий, 1/ч; K_p – коэффициент режима; $K_{\text{э}}$ – эксплуатационный коэффициент; $K_{\text{пр}}$ – коэффициент вида приемки; K_y – коэффициент роста надежности; $\prod_{i=1}^n K_{\text{шгр}}$ –

произведение коэффициентов, учитывающих влияние на интенсивность отказов конструктивно-технологических факторов третьей группы; n – число учитываемых конструктивно-технологических факторов.

Суммарная интенсивность отказов составила $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_{\Sigma i} = 3,390159386 \text{ 1/ч.}$

С учетом этого наработка до отказа датчика равна

$$T_o = \frac{1}{\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i} = \frac{1}{3,390159386 \cdot 10^{-6}} = 294971,38 \text{ ч.}$$

Поскольку при выполнении функции контроля в режиме функционирования находятся все элементы датчика, параметр потока отказов $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i$ при выполнении функции можно считать равным $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i = 3,390159386 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$

Расчет вероятности невыполнения функции защиты на требование (ситуация «пропуск события»)

Расчет вероятности невыполнения функции защиты на требование проводится по функции формирования сигналов предупредительной аварийной защиты (АЗ) с использованием структурной схемы датчика, приведенной на рис. 1. Схемы на рис. 2 и последующих рисунков содержат только те элементы и узлы датчика, отказ которых может привести к отказу по рассматриваемой функции и ситуации.

Интенсивность отказов датчика $\lambda_{\text{проп.АЗ}}$ определяется по формуле (2) и в соответствии с данными справочника составляет $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_i = 2,46429783 \text{ 1/ч.}$ Вероятность пропуска события $P_{\text{проп.АЗ}}$ определяется по формуле

$$P_{\text{проп.АЗ}} = 1 - e^{-\lambda_{\text{проп.АЗ}} t}, \quad (4)$$

где t – максимальное значение межконтрольного интервала времени, равное 13 мин $\approx 0,22 \text{ ч.}$

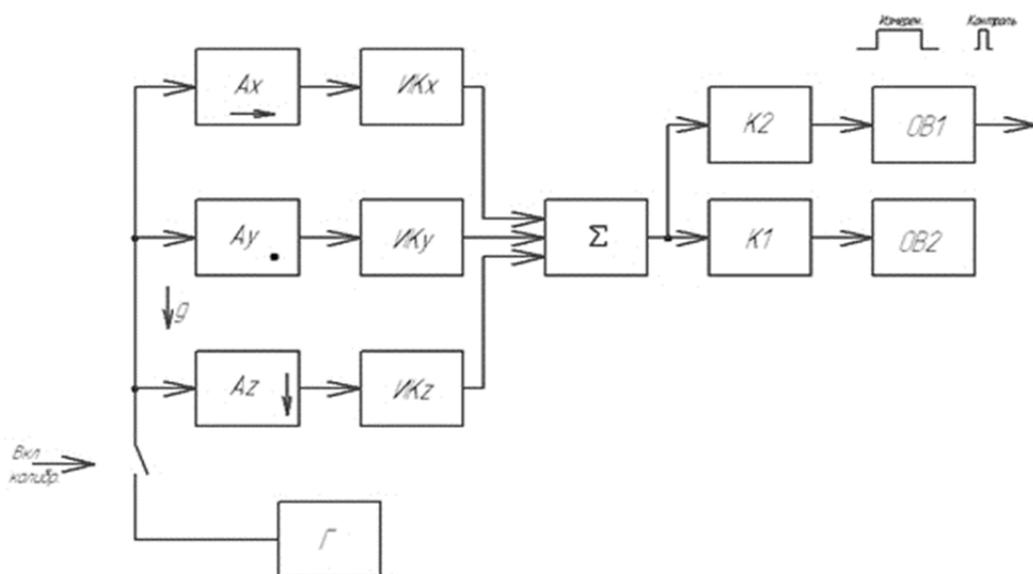


Рис. 1. Структурная схема сейсмодатчика СД 4: X, Y, Z – обозначение измерительных осей акселерометра; g – модуль и направление гравитационного ускорения

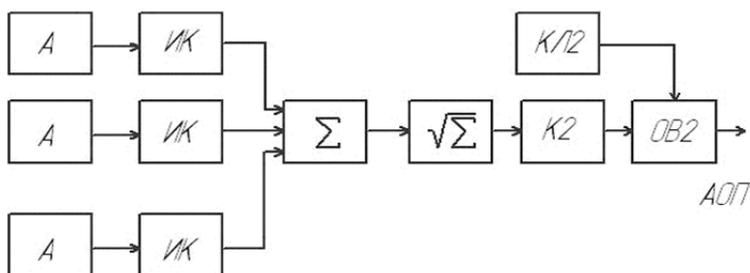


Рис. 2. Структурная схема датчика по функции формирования сигнала для запуска регистратора в ситуации «пропуск сигнала» и для оценки отказов по функции регистрации:
 А – акселерометры, ИК – измерительные каналы, Σ – суммирующий усилитель и извлекатель корня квадратного формирователя аналоговых сигналов, К2 – компаратор, ОВ2 – одновибратор, КЛ2 – аналоговый ключ для управления режимом работы ОВ2

С учетом данных по интенсивности отказов элементов $\lambda_{\text{проп.АЗ}}$ вероятность пропуска события составит

$$P_{\text{проп.АЗ}} = 1 - e^{-2.46429783 \cdot 10^{-6} \cdot 0.22} = 1 - 0,999999457 = 5,4 \cdot 10^{-7}.$$

Расчет вероятности ложного срабатывания

Расчет вероятности ложного срабатывания проводится с использованием структурной схемы датчика, приведенной на рис. 2. Интенсивность отказов датчика $\lambda_{\text{лож.АЗ}}$ определена по

формуле (2) и составила $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_{\text{э}} = 3,07952979$ 1/ч.

Вероятность ложного срабатывания $P_{\text{лож.АЗ}}$ определяется как

$$P_{\text{лож.АЗ}} = 1 - e^{-\lambda_{\text{лож.АЗ}} t}. \quad (5)$$

С учетом данных интенсивности отказов элементов $\lambda_{\text{лож.АЗ}}$ вероятность события ложного срабатывания равна $6,8 \cdot 10^{-7}$.

Расчет параметра потока отказов по функции регистрации

Параметр потока отказов по функции регистрации $\lambda_{\text{проп.ПЗ}}$ и $\lambda_{\text{лож.ПЗ}}$ определяется с использованием структурных схем (рис. 3, 4) для ситуации «пропуск события» и «ложное срабатывание» соответственно. Интенсивности отказов определены по формуле (2) и составили с учетом данных

об интенсивности отказов для ситуации «пропуск события»: $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_{\text{э}} = 2,93824029 \cdot 10^{-6}$ 1/ч,

для ситуации «ложное срабатывание»: $\sum_{i=1}^m N_i \lambda_{\text{э}} = 2,97291549 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Тогда параметр потока отказов составляет: $\lambda_{\text{проп.ПЗ}} = 2,28599519 \cdot 10^{-6}$ 1/ч,
 $\lambda_{\text{лож.ПЗ}} = 2,93824029 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

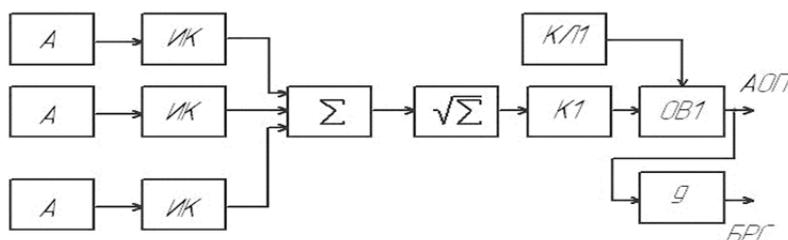


Рис. 3. Структурная схема датчика по функции формирования сигнала аварийной защиты в ситуации «пропуск сигнала»: К1 – компаратор, ОВ1 – одновибратор, КЛ1 – аналоговый ключ для управления режимом работы одновибратора ОВ1, g – инвертор формирователя дискретных сигналов по каналу П1

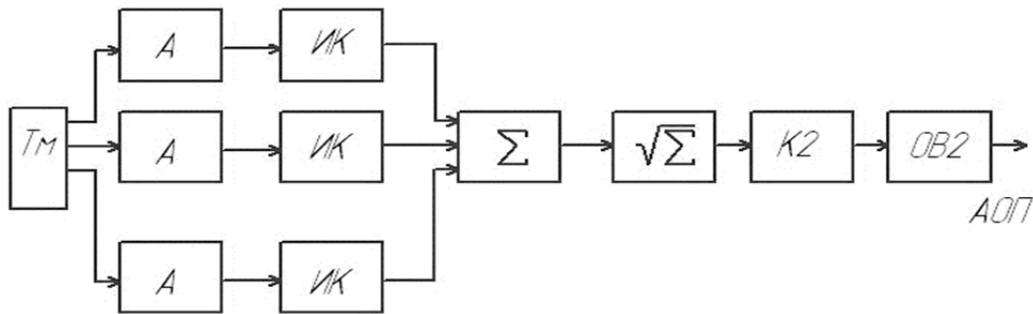


Рис. 4. Структурная схема датчика по функции формирования сигнала для запуска регистратора в ситуации «ложное срабатывание»: К2 – компаратор, Тм – таймер

Расчет надежности комплекта датчиков, соединенных по схеме «2 из 3»

Комплект трех датчиков СД 4, соединенных по схеме «2 из 3», образует резервируемую восстанавливаемую систему. Расчет эквивалентной интенсивности отказов такой системы $\lambda_{\text{эКВ}}$ (резерв нагруженный, восстановление неограниченное), состоящей из N одинаковых элементов, проводится по формуле

$$\lambda_{\text{эКВ}} = k \cdot \lambda \cdot c_N^k \cdot \gamma^n, \quad (6)$$

где $C_N^k = \frac{N!}{k!(N-k)!}$, а $\gamma = \lambda \tau_{\text{восст}}$; λ – максимальное значение интенсивности отказов одного датчика; k – число рабочих элементов; n – число резервных элементов; N – общее число элементов ($N = k + n$); γ – интенсивность восстановления; $\tau_{\text{восст}}$ – время восстановления (с учетом времени обнаружения неисправности).

Для рассматриваемого варианта максимальное значение интенсивности отказов соответствует ситуации «ложное срабатывание». При этом $\lambda_{\text{ложАЗ}} \leq 3,1 \cdot 10^{-6}$ 1/ч. Остальные параметры равны: $k = 2$; $n = 1$; $N = 3$; $\tau_{\text{восст}} = 1$ ч. Тогда

$$\lambda_{\text{эКВ}} = 2\lambda C_3^2 (\lambda \cdot 1)^1 \cdot 1 = 2\lambda \frac{3!}{2!(3-2)!} \cdot 1 = 2\lambda^2 \cdot 3 \cdot 1 = 6\lambda^2. \quad (7)$$

Интенсивность отказов комплекта датчиков СД 4, соединенных по схеме «2 из 3», равна: $\lambda_{\text{эКВ}} = 6 \cdot \lambda_{\text{ложАЗ}}^2 = 6 \cdot (3,07952979 \cdot 10^{-6})^2 = 5,6901022 \cdot 10^{-11}$ 1/ч. Вероятность функции защиты на требование $P_{\text{АЗ}} = 1 - e^{-\lambda_{\text{эКВ}} \tau_{\text{восст}}}$, что при полученных значениях $\lambda_{\text{эКВ}}$ и $\tau_{\text{восст}}$ с точностью до 7 знаков равно нулю. Указанное значение $P_{\text{АЗ}}$ свидетельствует о выполнении требований ТЗ (не более $5 \cdot 10^{-7}$).

Заключение

Предложенный метод оценки безотказности, основанный на учете взаимосвязи выполняемых функций системы аварийной защиты с узлами структурной схемы для их реализации и с периодичностью автоматического контроля исправности сейсмодатчиков на протяжении всего жизненного цикла, позволил подтвердить требования нормативной документации по безопасности объектов атомной энергетики по средней наработке до отказа не менее 250 000 ч, вероятностям пропуска события и ложного срабатывания, а также по параметру потока отказов. С помощью расчета надежности получена оценка безотказности до получения экспериментальных результатов, что значительно ускорило процесс подтверждения требований безотказности на данных этапах. В настоящее время указанные показатели безотказности подтверждены результатами эксплуатации систем аварийной антисейсмической защиты реакторных установок всех АЭС РФ (за исключением Смоленской), АЭС Ирана, Болгарии, Индии.

Библиографический список

1. Торгашин, С. И. Высокочувствительный МЭМС-датчик сейсмоскорости для систем аварийной защиты и диагностики / С. И. Торгашин, А. А. Папко // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 7–9.
2. Системы сейсмомониторинга и антисейсмической аварийной защиты реакторной установки АЭС удаленного конфигурирования / А. Г. Дмитриенко, А. В. Блинов, А. А. Папко, М. А. Калинин, А. В. Николаев // Датчики и системы. – 2012. – № 9. – С. 34–38
3. Трофимов, А. А. Методы технической диагностики : учеб. пособие / А. Н. Трофимов, Б. В. Цыпин, А. А. Трофимов. – Пенза : Инф.-изд. цент ПензГУ, 2006. – 121 с.
4. Надежность изделий электронной техники, электротехники и квантовой электроники. Справочник. – М. : МО РФ, 2006. – 641 с.
5. ГОСТ 27.301–95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. – Взамен ГОСТ 27.410-87 (в части п.2); вступил в действие с 01.01.1997. – М. : Комитет Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации, 1993. – 10 с.

Торгашин Сергей Иванович

кандидат технических наук,
директор по производству,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: niifi@sura.ru

Torgashin Sergey Ivanovich

candidate of technical sciences,
director of production,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Папко Антонина Алексеевна

доктор технических наук,
заместитель начальника конструкторского бюро,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: inercial@niifi.ru

Papko Antonina Alekseevna

doctor of technical sciences,
deputy Head of design department,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Полякова Екатерина Алексеевна

аспирант,
главный специалист,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: info@niifi.ru

Polyakova Ekaterina Alekseevna

postgraduate student,
chief Specialist,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 658.562.64

Торгашин, С. И.

Об оценке качества и надежности сейсмодатчиков систем аварийной защиты реакторных установок / С. И. Торгашин, А. А. Папко, Е. А. Полякова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 6–13.