

ОЦЕНИВАНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РЕАКТОРОВ

Д.А. Бережной, С.Е. Кравцова, К.Н. Маловик

*Севастопольский государственный университет,
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.*



Для контроля параметров технологического процесса служат измерительные каналы (ИК) исследовательских реакторов.

Рассматривается задача оценки неустойчивости погрешности ИК нейтронной мощности исследовательских реакторов. Цель работы – исследование общих закономерностей тренда неустойчивости характеристик ИК во времени и определение основных составляющих потерь полезного сигнала при оценке неустойчивости метрологических характеристик каналов.

Для оценки неустойчивости метрологических характеристик средств измерения в работе [7] предлагается использовать математическое моделирование, а в нормативном документе [2] рекомендуется оценивать неустойчивость по функции чувствительности средств измерения. Но такие подходы не позволяют оценить индивидуальность влияния каждого воздействующего фактора на погрешность ИК. Поэтому целесообразно применить методологию Тагучи, основанную на определении потерь с помощью отношения «полезный сигнал / шум».

Рассмотрены факторы, воздействующие на неустойчивость погрешности ИК. Определена область упреждающего контроля неустойчивости погрешности ИК нейтронной мощности. Предложено применение подходов теории Тагучи для оценки неустойчивости метрологических характеристик измерительных каналов.

Ключевые слова: исследовательский реактор, измерительный канал, неустойчивость метрологических характеристик, теория Тагучи.

ВВЕДЕНИЕ

Исследовательские реакторы применяются для проведения научно-исследовательских испытаний в области ядерной и нейтронной физики, радиационной химии, для производства радиоактивных изотопов и для изучения свойств материалов, приборов и оборудования, облученных в полях нейтронов и гамма-квантов, а также для обеспечения учебного процесса при подготовке специалистов атомной промышленности и АЭС.

Как и все реакторы АЭС, исследовательские реакторы обеспечиваются системой управления и защиты (СУЗ). Контроль технологических параметров реактора система СУЗ осуществляет с помощью измерительных каналов (ИК).

Параметром, определяющим качество функционирования ИК, отражающим неизменность во времени его метрологических характеристик (МХ), является стабиль-

ность. При этом количественной оценкой стабильности ИК служит нестабильность МХ ИК [1 – 3].

Как правило, объектом исследований в области метрологической нестабильности являются различные физико-химические процессы, вызывающие изменение МХ ИК во времени. Однако общие закономерности тренда нестабильности МХ ИК пока остаются малоисследованными, что прежде всего связано с отсутствием методики исследования нестабильности МХ ИК [1 – 3].

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ НЕЙТРОННОЙ МОЩНОСТИ

Технологическая схема исследовательского реактора включает в себя оборудование и системы, обеспечивающие его работу во всех предусмотренных проектом режимах и соответствующие нормам ядерной и радиационной безопасности.

В активной зоне реактора происходит процесс цепной ядерной реакции деления урана. 90% актов деления происходит под действием тепловых нейтронов (энергией $< 0,2$ эВ). После актов деления полученные быстрые нейтроны замедляются в воде или графитовом отражателе. Вода постоянно обеспечивает отвод тепла из активной зоны.

Технологическая схема исследовательского реактора представлена на рис. 1.

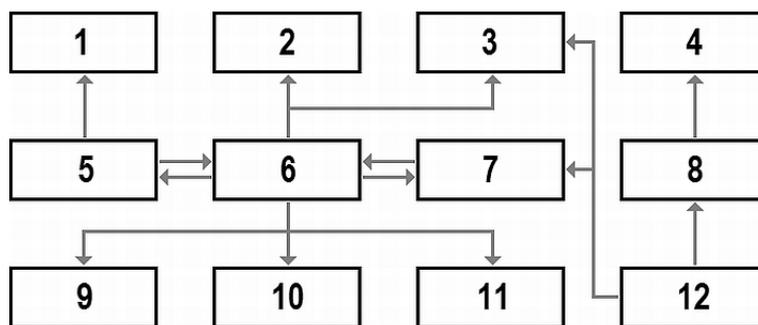


Рис.1. Технологическая схема исследовательского реактора

На схеме приняты следующие обозначения:

- 1 – система контроля радиоактивного загрязнения воды первого контура;
- 2 – система контроля температуры, давления и расхода контура очистки, уровня воды в баке реактора и сигнализации в случае их отклонения от установленных значений;
- 3 – система радиометрического контроля всех видов ионизирующих излучений;
- 4 – система контроля температуры, давления и расхода контура охлаждения;
- 5 – система периодической очистки обессоленной воды от избыточного содержания продуктов коррозии, механических примесей, радиоактивных загрязнений и компенсации объема;
- 6 – реактор;
- 7 – система управления и защиты реактора (контроль мощности цепей, управление цепной реакцией и аварийное гашение цепной реакции);
- 8 – система охлаждения активной зоны реактора естественной циркуляцией теплоносителя;
- 9 – система спецканализации (сбора сточных вод, имеющих радиоактивное загрязнение);
- 10 – система спецвентиляции для создания нормальных санитарно-гигиенических условий в производственных помещениях;
- 11 – «горячая камера» для работ с изделиями высокой активности;

12 – система аварийного электроснабжения.

Одним из наиболее важных элементов исследовательских реакторов являются ИК нейтронной мощности, предназначенные для контроля уровня мощности реактора и для производства пуско-наладочных работ, применяемые в СУЗ.

В водо-водяных исследовательских реакторах эксплуатируется семь ИК нейтронной мощности, применяемых в пусковых, рабочих и защитных системах:

- три ИК подают сигнал на приборы аварийной защиты по периоду мощности и по уровню мощности;

- два ИК подают сигнал на систему пуска, предназначенную для осуществления пуска реактора с уровня мощности 10^{-4} % до 10 % номинальной мощности;

- два ИК подают сигнал на систему автоматического регулирования (АР) [4].

Важной особенностью ядерного реактора является то, что изменение плотности нейтронов в нем идет практически без запаздывания за изменением реактивности. Этим определяются требования к системе измерения плотности нейтронов и периода реактора – она должна быть практически безынерционной. В качестве датчиков системы измерения, удовлетворяющих указанным требованиям, используются нейтронные детекторы [4].

Нейтронные детекторы предназначены для преобразования энергии излучения в ядерном реакторе в электрический сигнал. Так как нейтроны не имеют заряда и непосредственно не вызывают ионизации в веществе, для их регистрации используют эффект вызываемых ими ядерных реакций, сопровождающийся образованием заряженных частиц (α -частиц или электронов). Нейтронный датчик, работающий на этом принципе, называется *ионизационной камерой*.

В ИК нейтронной мощности исследовательских реакторов в качестве датчика применяется ионизационная камера КНК-57М, предназначенная для измерения плотности потока нейтронов с компенсацией сопутствующего гамма-излучения и используемая в системах управления и защиты ядерных реакторов [4].

Работа ионизационных камер основана на регистрации ионов, возникающих при прохождении через камеру ионизирующего излучения. При облучении газа ионизирующими излучениями возникают два процесса: ионизация и рекомбинация.

В момент прохождения заряженной частицы через вещество ее электрическое поле взаимодействует с электронной оболочкой атомов. В результате часть электронов отрывается от атомов, и на пути частицы образуются положительные ионы.

При прохождении через вещество электромагнитное излучение (кванты) поглощается, при этом возникают заряженные частицы (электроны, позитроны), которые способны ионизировать атомы среды. При столкновении ионов и атомов среды противоположных знаков частицы рекомбинируют, т. е. образуются нейтральные молекулы.

В зависимости от вида излучения и свойств ионизирующей среды определяющим является тот или иной тип рекомбинации. Вероятность рекомбинации зависит от относительной скорости частиц в момент соударения и определяется свойствами газа. При увеличении относительной скорости ионов коэффициент рекомбинации уменьшается. Естественно, что достаточно много эффектов оказывают влияние на процесс ионизации. Участки статической (вольтамперной) характеристики газового разряда представлены на рис. 2а: участок 1 – область прямой пропорциональности между током и напряжением; участок 2 – область неполной пропорциональности; участок 3 – область ионизационной камеры, работающей в токовом режиме; участок 4 – область ударной ионизации или область счетчиков; участок 5 – область пробоя.

Так как ионизация газа в объеме ионизационной камеры производится α -частицами и γ -квантами, всегда имеющимися в реакторе, а мощность реактора пропорциональна количеству нейтронов (n), то необходимо выделить сигнал, обусловленный только нейтронами. Для этого используют специальные *компенсированные ионизационные камеры* (рис. 2б, где I_γ – выходной токовый сигнал, полученный в результате ионизации γ -квантами; I_n – выходной токовый сигнал, пропорциональный количеству нейтронов).

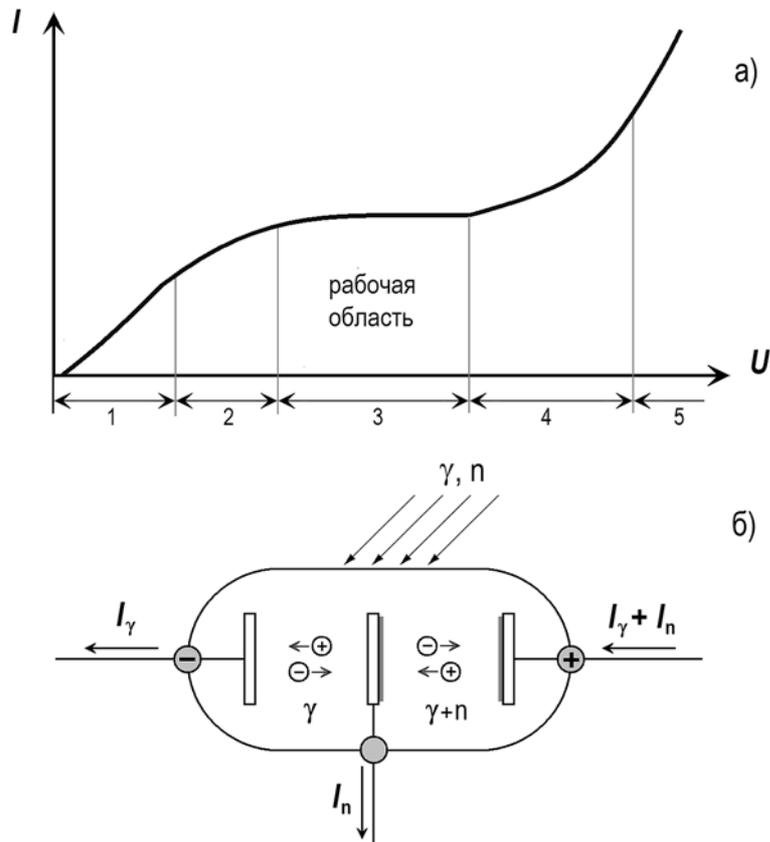


Рис. 2. Компенсированная ионизационная камера: а) вольтамперная характеристика; б) схема

Сигнал ионизационной камеры определяется выражением

$$I = \eta_{\text{ток}} \varphi, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{ток}}$ – чувствительность камеры; φ – плотность потока нейтронов.

ОЦЕНКА НЕСТАБИЛЬНОСТИ МХ ИК НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ТАГУЧИ

В процессе нормальной эксплуатации на ИК воздействуют различные факторы, что приводит к изменению МХ во времени.

Нестабильностью МХ ИК $m(t)$ является изменение МХ ИК за установленный интервал времени [2]. Основной МХ ИК является предельно допустимое значение погрешности (Δ).

На этапе нормальной эксплуатации ИК принято считать, что погрешность как МХ имеет начальное значение Δ_{nr} , а также критические значения $\Delta_{кр}$, при котором происходит метрологический отказ [8]. Кроме того, существует некоторое множество значений $\Delta_{k,l,\dots,nr}$, формирующих область упреждающего контроля

нестабильности исследуемой погрешности ИК.

В результате воздействия на элементы ИК влияющих факторов погрешность ИК с течением времени может значительно увеличиваться до критического значения $\Delta_{кр}$, при котором наступает внезапный метрологический отказ ИК, что можно характеризовать как пессимистический прогноз «П», определяемый появлением точки «В», в которой для оценки погрешности требуется уже упреждающий контроль нестабильности ИК (рис. 3).

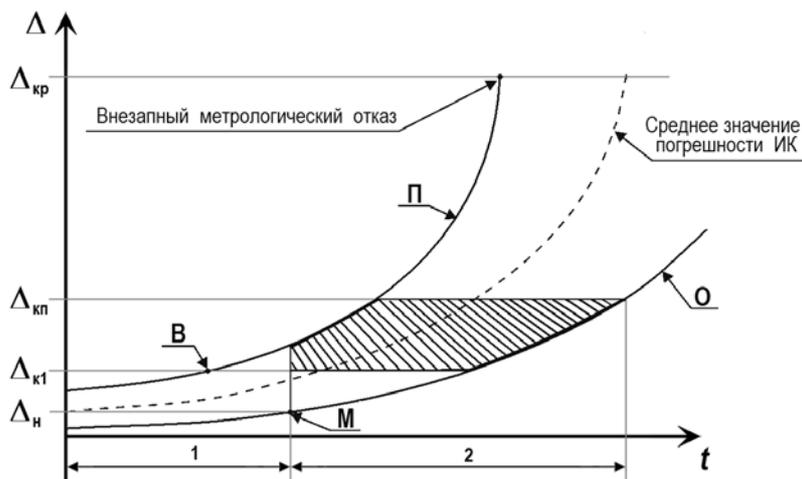


Рис.3. Изменение нестабильности погрешности ИК в процессе эксплуатации: 1 – время нормальной эксплуатации; 2 – область упреждающего контроля

Возможный постепенный метрологический отказ проявляется в постепенном изменении погрешности ИК, что можно характеризовать как оптимистический прогноз «О», определяемый появлением точки «М». Причинами его обычно бывают износ, старение и другие деградационно нарастающие изменения в деталях и узлах ИК. Время наступления постепенного метрологического отказа функционально связано с интенсивностью физико-механических процессов, происходящих при работе ИК. По характеру проявления постепенные метрологические отказы являются латентными, и могут быть выявлены за счет проведения упреждающего контроля нестабильности исследуемой погрешности ИК в области 2, что показано на рис. 3.

В работе [7] для оценки нестабильности МХ средств измерения (СИ) предлагается использовать математическое моделирование, а в нормативном документе [2] рекомендуется оценивать нестабильность СИ путем нахождения функции чувствительности СИ. Однако такие подходы, основанные на использовании погрешностей ИК, не позволяют оценить индивидуальность влияния представленных факторов (рис. 4). Поэтому целесообразно применить методологию Тагучи, которая основана на определении потерь с помощью отношения «полезный сигнал/ шум» [6].

Подход к исследованию нестабильности погрешности ИК на основе теории Тагучи позволит выявить коренные причины изменения погрешности ИК в процессе эксплуатации, что даст возможность в дальнейшем вести работу над методом прогнозирования нестабильности погрешности ИК на этапе проектирования.

Выявление коренных причин отказов ИК нейтронной мощности позволяет выявить определяющие воздействия на структурные элементы ИК [5]. При этом МХ датчика как наиболее подверженного изменению стабильности МХ элемента ИК определяются следующими основными причинами:

- падение сопротивления изоляции;
- медленное уменьшение чувствительности;

- влияние температуры;
- короткое замыкание питающих электродов;
- обрыв питающего электрода, что, в конечном счете, может привести к формированию либо заявки на срабатывание защиты по данному каналу, либо к формированию АР, либо к несрабатыванию аварийной защиты (АЗ) по каналу, которому принадлежит данный ИК;
- наводки напряжения на линии связи ИК от мощного силового электрооборудования, которые могут привести к ложной заявке на срабатывание по каналу данного ИК.

На основании указанных факторов можно сформировать группу воздействий, необходимых для исследования нестабильности погрешности ИК, которую можно представить в виде графической модели (рис. 4) [5].

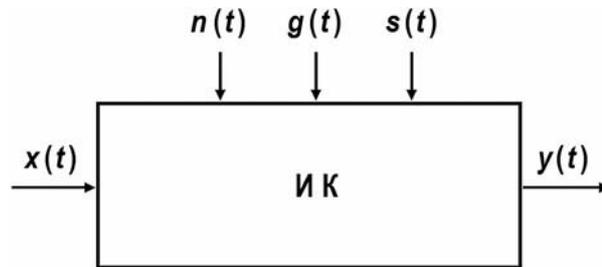


Рис. 4. Модель ИК: t – время наблюдений и появления флуктуаций; $x(t)$ – полезный сигнал; $n(t)$ – помеха в результате температурной или временной нестабильности; $g(t)$ – электрическая помеха в виде шума; $s(t)$ – электрическая помеха в виде наводки

Данные воздействия на нестабильность погрешности ИК можно реализовать с помощью проведения испытаний в составе информационно-измерительных комплексов либо с применением специальных температурных и климатических камер, источников (имитаторов) наводок и помех, генератора циклического изменения электропитания и т.д.

В общем виде уравнение измерения $y(t)$ ИК имеет вид

$$y(t) = x(t) + n(t) + s(t) + g(t), \quad (2)$$

где $y(t)$ – результат измерения ИК.

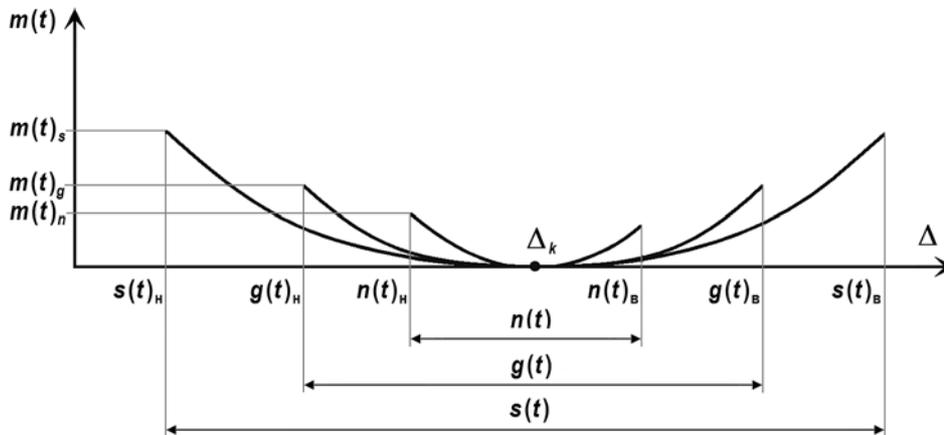


Рис. 5. Геометрическая интерпретация принимаемой концепции Тагучи при исследовании нестабильности погрешности $m(t)$ ИК от воздействия влияющих факторов: $m(t)_s$, $m(t)_g$, $m(t)_n$ – нестабильности погрешности ИК, вызванные влиянием $s(t)$, $g(t)$, $n(t)$ соответственно

В связи с тем, что уравнение (2) может геометрически интерпретироваться (рис. 5), предполагаем, что

- количественная характеристика составляющих $n(t)$, $s(t)$, $g(t)$ носит условный характер;
- исходные условия (температура, время, помехи, наводки) постоянны;
- качественное изменение составляющих уравнения (2) зависит от тренда изменения Δ .

С ростом потерь увеличивается нестабильность погрешности $m(t)$, что влечет за собой ухудшение характеристик полезного сигнала.

На основе теории Тагучи понятие «отношение полезный сигнал/шум» определяется как мера углового отклонения функциональной характеристики системы от заданного значения.

Метод Тагучи заключается в экспериментальном определении таких значений параметров ИК, которые делают его нечувствительным (робастным) к факторам, ухудшающим его выходные МХ.

Если формально определять соотношение полезного сигнала $x(t)$ и влияющих факторов $n(t)$, $g(t)$, $s(t)$ как меру углового отклонения θ функциональной характеристики ИК от полезного сигнала, то уравнение измерения ИК $y(t)$ можно геометрически интерпретировать разложением, представленным на рис. 6 [6].

Отношение «полезный сигнал/шум» определяется в ходе двухэтапной процедуры, направленной на уменьшение изменчивости полезного сигнала ИК:

- определение таких уровней влияющих факторов, которые максимизируют отношение «полезный сигнал/шум»; при этом минимизируется угловое отклонение $y(t)$ от заданного значения и, следовательно, нерегулируемая составляющая потеря;
- ранжирование степени чувствительности ИК к влияющим факторам.

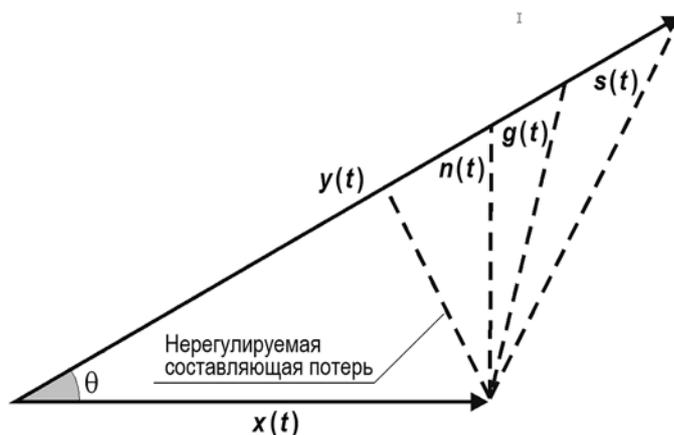


Рис. 6. Разложение совокупности влияющих факторов на составляющие

Метод оценки метрологической нестабильности измерительных каналов на основе подходов теории Тагучи включает в себя следующие операции:

- установление требуемого значения полезного сигнала;
- определение вида функциональной зависимости $y(t)$ от воздействующих факторов;
- создание программы испытаний для индивидуального оценивания потерь, связанных с влиянием температурной и временной составляющих, составляющих электрических помех в виде шума и электрических наводок;
- выявление области допустимых изменений потерь от влияния температурной

составляющей, временной составляющей, составляющей электрических помех в виде шума и составляющей электрических наводок;

- определение фактора, оказывающего наибольшее влияние;
- определение зависимости между величиной влияющего фактора и нестабильностью погрешности ИК;
- оценка нестабильности погрешности ИК.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены причины отказов измерительных каналов нейтронной мощности исследовательского реактора, что позволило установить основные составляющие потерь полезного сигнала.

Исследована область упреждающего контроля нестабильности погрешности измерительных каналов.

Предложено применение подходов теории Тагучи для оценки нестабильности погрешности измерительных каналов.

Литература

1. РМГ 29-99 Метрология. Основные термины и определения. – Взамен ГОСТ 16263 – 70; введ. 2001-01-01. – Минск: Межгосударственный совет по метрологии, стандартизации и сертификации, 2000. – 46 с.
2. РМГ 74-2004 ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. – Взамен МИ 2187-92; введ. 2005-03-01. – М: Стандартиформ, 2005. – 22 с.
3. *Бережной Д.А., Маловик К.Н.* Анализ нормативной базы при прогнозировании нестабильности метрологических характеристик измерительных каналов АЭС / Сб. научных трудов СНУЯЭиП, вып. №4 – Севастополь, 2013. – С. 7-16.
4. Технические средства управления ядерными реакторами с водой под давлением для АЭС: учеб./ А.Ю. Погосов; под ред. В.А. Дубковского – Одесса: Наука и техника, 2012. – 288 с.: ил.
5. *Бережной Д.А., Маловик К.Н., Мирошниченко А.Н.* Неопределенность метрологических характеристик измерительных каналов // Системи обробки інформації, вип. №3 (119). Харків, 2014. – С. 127-130
6. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагучи. / Пер. с англ. – М.: СЕЙФИ, 2002. – 384 с.
7. *Мищенко С.В.* Метрологическая надежность измерительных средств / С.В. Мищенко, Э.И. Цветков, Т.И. Чернышова – М.: Машиностроение, 2001– 96 с.
8. Сальников Н.Л. Критерий эффективности структур измерительных систем повышенной надежности// Известия вузов. Ядерная энергетика. 2012, №1. – С. 66-70.

Поступила в редакцию 06.05 2015 г.

Авторы

Бережной Дмитрий Анатольевич, аспирант

E-mail: bereznoyd@mail.ru

Кравцова Светлана Евгеньевна, доцент, кандидат техн. наук

E-mail: Lana.Kravtsova.1977@mail.ru

Маловик Константин Николаевич, заведующий кафедрой, доктор техн. наук

E-mail: intiisks@yandex.ru

UDC 621.317

EVALUATION OF INSTABILITY OF THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF RESEARCH REACTORS MEASURING CHANNELS

Berezhnoj D.A., Kravtsova S.E., Malovik K.N.

Sevastopol State University. 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia

ABSTRACT

Research reactors are used for research trials in the field of nuclear and neutron physics, radiation chemistry, for the production of radioactive isotopes for the study of the properties of materials, devices and equipment, in the fields of irradiated neutrons and gamma rays, as well as for the preparation of the educational process specialists of the nuclear industry and nuclear power plants.

Measuring channels which used at research reactors for control the process parameters should provide high precision.

The parameter that determines the quality of the functioning of the measuring channels, reflecting the unchanged during the time of its metrological characteristics are stable. Stability is the parameter that determines the quality of the functioning of the measuring channels and reflecting the immutability during the time their metrological characteristics. The quantitative estimation of the stability of the measurement channels is the instability of their metrological characteristics [1–3].

However, to date there is no single methodology of the study and evaluation of the instability of the metrological characteristics of measuring channels. The patterns of trend of the metrological characteristics of measuring channels are scarcely explored. All this determines the need to develop approaches and methods of assessment and prediction of instability of metrological characteristics of measuring channels.

The limit of error (D) is the one of the main metrological characteristics.

The article discusses the problem of estimating the instability of error of measuring channels neutron power research reactors. The purpose of the work is to study the general laws of the trend of instability characteristics of measuring channels during the time and determining the main components of the loss of the desired signal in the evaluation of the instability of the metrological characteristics of measuring channels neutron power.

In the technical literature [7] to estimate the instability of metrological characteristics of measuring instruments are encouraged to use mathematical modeling, and in the normative document [2] is recommended to evaluate the instability of measuring instruments by finding their sensitivity function. However, such approaches do not allow us to estimate the effect of each individual factor influencing on the measuring channel error. It is therefore advisable to apply Taguchi methodology, which is based on the determination of the loss by dint of finding values the ratio «useful signal / noise».

Measuring channels of neutron power is one of the most exposed to changes instability. On the basis of the analysis of the causes of failures of measuring channels in article [5] concluded that the most unstable part of the measuring channel to the effects of influencing factors is the sensor (transducer).

The article identifies factors affecting the instability of error measuring channel neutron power and areas of preventive control an instability of error of measuring channels neutron power. In the article proposed use the methods of the Taguchi theory

for assessing the instability of metrological characteristics of measuring channels.

Key words: research reactor, measuring channel, instability of metrological characteristics, the theory of Taguchi.

REFERENCES

1. RMG 29-99 Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya [Metrology. Basic terms and definitions]. Instead of GOST 16263 – 70, introduced, 2001-01-01, Minsk, The Interstate Council for Metrology, Standardization and Certification, 2000. 46 p. (in Russian).
2. RMG 74-2004. GSI. Metody opredeleniya mezhpoverochnykh i mezhkalibrovochnykh intervalov sredstv izmerenij [Methods for determination of calibration intervals of measuring instruments]. Instead MI 2187-92; introduced 2005-03-01. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 22 p. (in Russian).
3. Berezhnoj D.A., Malovik K.N. Analiz normativnoj bazy pri prognozirovanii nestabil'nosti metrologicheskikh harakteristik izmeritel'nykh kanalov AES [Analysis of the regulatory framework in area predicting instability of metrological characteristics of NPP's measuring channels]. Sbornik nauchnykh trudov SNUYAiP, 2013, no. 3, pp. 7-16 (in Russian).
4. Pogosov A.Ya., Dubkovsky V.A. Tehnicheskie sredstva upravleniya yadernymi reaktorami s vodoj pod davleniem dlya AES [Technical instruments for management of NPP's pressurized water nuclear reactors]. gvaide. Odessa, Nauka i Tehnika Publ., 2012. 288p. (in Russian).
5. Berezhnoj D.A., Malovik K.N., Miroshnichenko A.N. Neopredelennost' metrologicheskikh harakteristik izmeritel'nykh kanalov [Instability of metrological characteristics of measuring channels]. Systemy obrobky informatsii. 2014. no. 3 (119), pp. 127-130 (in Ukraine).
6. Quality control, robust design and the Taguchi method. Edited by Khosrow Dehnad AT&T Bell Laboratories. 1989.
7. Mischenko S.V., Tsvetkov E.I., Chernyshova T.I. Metrologicheskaya nadezhnost' izmeritel'nykh sredstv [Metrological reliability of measuring instruments]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 96 p.
8. Sal'nikov N.L. Kriterij effektivnosti struktur izmeritel'nykh sistem povyshenoj nadezhnosti [Efficiency criterion of structures of measuring systems of high reliability]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2012, no. 1, pp. 66-70.

Authors

Berezhnoj Dmitriy Anatol'evich, PhD Student

E-mail: berezhnoyd@mail.ru

Kravtsova Svetlana Evgen'evna, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: Lana.Kravtsova.1977@mail.ru

Malovik Konstantin Nikolaevich, Head of Department, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: intiiisks@yandex.ru