

МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

© А.М. Панкин, канд. техн. наук, доцент,
Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова,
Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия

При проектировании технических объектов обычно ставится задача обеспечения их надежности в течение всего срока эксплуатации. На достижение этой цели, наряду с другими подходами, направлено создание систем диагностирования (СД). Особое значение приобретает создание СД, если речь идет об объектах, важных для безопасности большого количества людей.

В настоящее время актуальной задачей при диагностировании многих технических объектов является оценка их фактического состояния на момент выполнения процедуры диагностирования. На ее решение и направлена представленная методология создания систем технического диагностирования.

Для того чтобы создать эффективную систему диагностирования, нужно рассмотреть ряд вопросов, пути решения которых предлагаются в данной статье. Проводя процедуру диагностирования и оценивая техническое состояние контролируемых изделий на момент проведения диагностических измерений можно выйти на задачу оценки остаточного ресурса и управления сроком службы этих объектов.

Ключевые слова: техническая диагностика, система диагностирования, контроль технического состояния.

ВВЕДЕНИЕ

Научно-технический прогресс и бурное развитие вычислительной техники определяют необходимость пересмотра отношения к созданию систем диагностирования (СД) сложных и дорогостоящих технических объектов. Это связано с внедрением в практику построения систем диагностирования персональных компьютеров (ПЭВМ) и интерфейсных устройств, включающих аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). Их использование позволяет создавать достаточно мощные системы мониторинга технических объектов.

С другой стороны, участвовавшие аварийные ситуации на промышленных объектах определяют необходимость своевременного диагностирования особо ответственных блоков и систем, выход которых из строя может привести к тяжелым последствиям. Последнее обстоятельство приобретает особое значение, когда речь идет об объектах ядерной энергетики, в частности, измерительных каналах ядерных реакторов. Чтобы избежать несанкционированного срабатывания аварийной защиты (АЗ) реактора на подобных объектах производится дублирование каналов, входящих в состав системы управления и защиты (СУЗ). Своевременная замена неисправных блоков в этих каналах позволяет избежать более серьезных поломок всего канала в целом и других последствий, связанных с несвоевременной остановкой такого сложного и дорогостоящего объекта, каким является ядерный реактор [1]. Для создания современных систем диагностирования в ядерной энергетике необходима новая методология построения диагностического программного обеспечения, входящего в состав технических средств СД [2]. Такая постановка задачи представляется достаточно актуальной для реализации концепции ОАО «Концерн Росэнергоатом» о переходе с «технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) по регламенту» на «ТО и Р по техническому состоянию».

1. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ МЕТОДОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Методология диагностирования состоит из следующей последовательности действий на этапе, который можно назвать «Математическое моделирование»:

- описание диагностируемого объекта, включающее его структурную и функциональную схемы, характеристик *структурных единиц* объекта, а также *рабочих функций*, для выполнения которых данный объект создан или создается;
- подготовка необходимой информации для разработки математической модели (ММ) объекта на выбранном уровне его детализации;
- построение математической модели объекта на основе изучения физико-механических, химических свойств и параметров элементов объекта, его физической природы и механизма возможных отказов; при построении модели текущие состояния элементов и систем объекта описываются уравнениями, отражающими физические закономерности, имеющие место в жизненном цикле данного объекта;
- обособление выбранного уровня детализации модели с учетом построения возможных связей между рабочими функциями объекта и теми макропараметрами объекта, изменение которых в процессе эксплуатации вызовет существенное изменение рабочих функций в границах области работоспособности объекта;
- определение набора наиболее значимых параметров и характеристик объекта, которые подходят на роль диагностических признаков (ДП); уменьшение полученного набора ДП до возможного минимального количества;
- оценка диапазонов допустимых значений ДП, при нахождении объекта в работоспособном состоянии;
- определение набора величин, непосредственно измеряемых в процессе диагностирования объекта, которые могут быть использованы для оценки его *технического состояния*;
- построение диагностической модели (ДМ)

объекта, описывающей аналитические зависимости между непосредственно измеряемыми величинами и ДП объекта; получение такой модели позволяет перейти при оценке технического состояния объекта от пространства рабочих функций к пространству ДП;

- анализ возможности идентификации полного набора ДП;
- создание на одном из алгоритмических языков расчетной программы, реализующей алгоритмы построенных моделей диагностируемого объекта.

Составные части данного этапа и существующие между ними связи представлены на рис. 1.

Вторым этапом методологии является этап, на котором получается и обрабатывается измерительная информация. Он называется «Процедура диагностирования» и состоит из набора процедур, выполняемых каждый раз при проведении диагностических измерений. На этом этапе выполняется работа с использованием созданной ранее диагностической модели контролируемого объекта. Целью этого этапа является получение заключения о техническом состоянии объекта на момент проведения диагностических измерений.

При проведении второго этапа выполняется

ряд процедур:

- получение возможного объема измерительной информации;
- оценка погрешностей выполненных измерений;
- идентификация ДП с привлечением полученной диагностической модели объекта;
- оценка погрешностей идентификации ДП;
- оценка информативности выполненных измерений;
- постановка диагноза о техническом состоянии объекта на момент времени проведения измерений.

Составные части этого этапа и существующие между ними связи представлены на рис. 2.

Заключительный, третий этап методологии диагностирования включает переход к задаче технической диагностики, известной под названием «поиск дефекта», если на втором этапе объект был признан неработоспособным, или же решение задачи прогнозирования остаточного ресурса в противном случае. Для решения обеих задач предполагается наличие соответствующих алгоритмов, реализованных в программном обеспечении, входящем в *технические средства диагностирования СД* объекта.

На основе рассмотренного в данном разделе

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

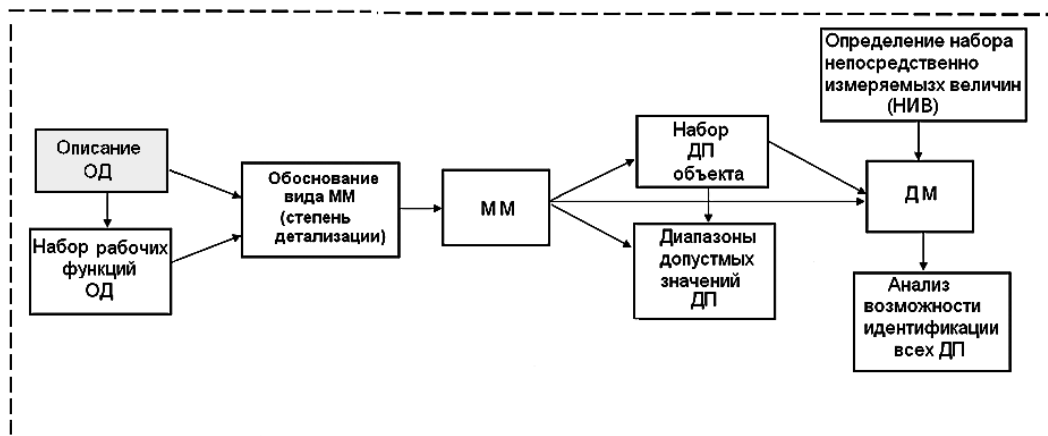


Рис. 1. Этап методологии «Математическое моделирование»

ПРОЦЕДУРА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

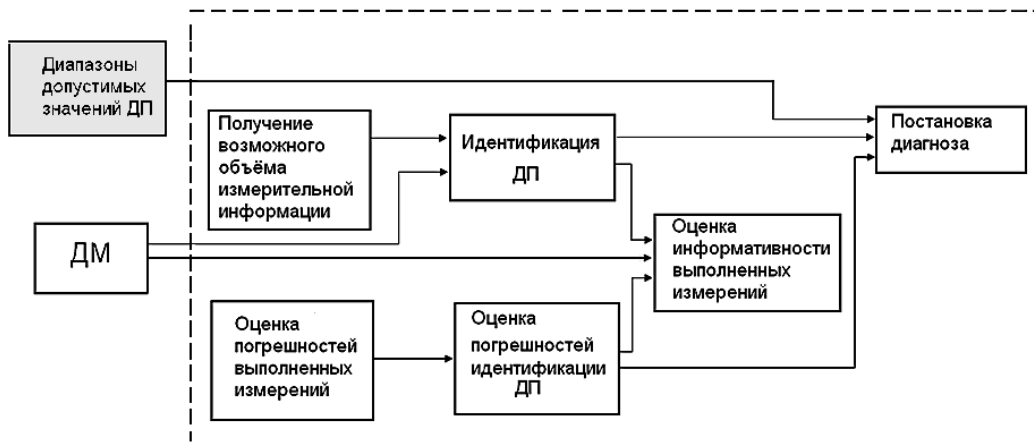


Рис. 2. Этап методологии «Процедура диагностирования»

материала можно сделать следующие выводы:

1. При создании системы диагностирования нового технического объекта, изменение состояния которого предполагается отслеживать в процессе отработки им заданного ресурса, проектирование СД объекта должно начинаться одновременно с проектированием самого объекта. Это позволит определить на этапе проектирования СД наиболее информативные для проведения диагностических измерений контрольные точки, внесение которых в конструкторскую и эксплуатационную документацию на объект обеспечит возможность подключения измерительных каналов на этапе эксплуатации объекта.

2. При идентификации выбранного для объекта набора диагностических признаков следует определять не только величины этих признаков, но и погрешности их определения на основе выполненных измерений. Это дает возможность оценить информативность [4] набора диагностических измерений и повысит вероятность определения времени выхода на предельное состояние, когда его эксплуатация должна быть прекращена.

2. КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ИХ ОБЩИЕ И ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ЧЕРТЫ

Очень часто слова «контроль» и «диагностика» встречаются вместе [3] и не всегда понятно, какой смысл вкладывается в выполняемые действия при реализации процедуры, в которой используются данные термины.

Вопрос о том, какие величины могут или должны быть определены в результате выполненных измерений и подводит нас к ответу на заданный вопрос, позволяющий понять разницу между контролем и диагностированием объекта. Очевидно, что и при контроле объекта и при его диагностировании должны быть выполнены какие-то измерения. Это их общая черта, и тут вопроса нет. Вопрос, только в каком объеме требуется измерительная информация. Скажем сразу, что, по мнению автора данной работы, минимальный объем измеряемых величин при диагностировании не может быть меньше двух, если не удастся измерить непосредственно структурный параметр объекта, а при контроле можно ограничиться и одним измерением.

Для того, чтобы понять, как объект в процессе отработки ресурса приближается к своему предельному состоянию необходимо дать определение работоспособного или технически исправного состояния объекта.

В соответствии с нормативной документацией под работоспособным понимается такое состояние объекта, при котором значения всех диагностических признаков, характеризующих способность ОД выполнять заданные функции, соответствуют установленным требованиям (приведенным в технической документации на объект). В этом случае говорят о том, что объект работает штатно.

Диагностическим признаком (ДП) называется параметр или характеристика, используемые при

диагностировании объекта, по которым оценивается техническое состояние ОД.

Таким образом, в отличие от задачи контроля, при диагностировании должен быть получен не просто объем измерительной информации по каким-либо физическим величинам, а также по этой информации выполнена идентификация всего набора диагностических признаков объекта, отвечающих за выполнение заданных ему конструктором рабочих функций.

Резюмируя сказанное, сформулируем, в чем же состоят отличия между контролем и диагностированием (если иметь в виду определение технического состояния):

1. И при контроле, и при диагностировании обязательным является наличие некоторого объема измерительной информации. Различие состоит в объеме и номенклатуре измеряемых величин.

2. При контроле первичная измерительная информация, как правило, используется для проведения допускового контроля, при диагностировании на основе этой информации выполняется идентификация тех величин, которые определены как диагностические признаки объекта.

3. При контроле не оценивается изменение реального технического состояния объекта, в случае же диагностирования эта одна из основных задач, которая формулируется как прогнозирование остаточного ресурса объекта.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА И РАБОЧИХ ФУНКЦИЙ

При диагностировании в первую очередь необходимо определиться с уровнем детализации контролируемого объекта. Современные изделия, системы, механизмы (объекты диагностирования) могут включать сотни и тысячи более мелких частей (элементов), которые нет необходимости отдельно отображать на структурной схеме объекта. Описание возможных связей между большим количеством элементов объекта значительно бы усложнило его математическую модель и затруднило ее использование в практических задачах диагностики. Поэтому при решении задач диагностики идут по пути некоторого укрупнения отдельных частей объекта и переходят к оптимальному количеству его структур, которые определяются как структурные единицы (СЕ) объекта диагностирования. При этом структура отдельной СЕ в дальнейшем рассмотрении процессов в ОД больше не фигурирует, а сама СЕ представляется неким «черным ящиком» с каким-то количеством «входов» и «выходов», между которыми имеются *установленные* связи. Такие связи описываются в виде коэффициентов передачи или в виде передаточных характеристик. Собственно, такое укрупнение постоянно принимается к рассмотрению в реальной жизни. Главное, чтобы при таком укрупнении структурной единицы ОД, вглубь ее не ушли отдельные функции объекта, которые необходимо контролировать на предмет соответствия их требованиям технической документации на этот объект. В пре-

деле весь ОД может представлять собой одну СЕ, детальная структура, которой не рассматривается. Указанные связи в виде передаточных характеристик учитываются при построении математической модели этого объекта.

Из числа определенных, после детализации структуры объекта, структурных единиц (параметров или характеристик) часть из них при диагностировании будет претендовать на роль *диагностических признаков* объекта (параметров или характеристик).

Рассмотрим, как связаны *параметры* (характеристики) *процесса*, протекающего в объекте при его функционировании и *рабочими функциями*, возложенными на объект его конструктором.

По-видимому, целью создания какого-либо объекта является решение ряда задач (одной задачи) при котором выполняется или не выполняется какое-либо действие. Под действием можно понимать, например, создание магнитного поля, электрического поля, выделение тепла и ряд других функций, которые можно рассматривать как окончательные (рабочие, решающие одну из задач ОД, определенную в его технической документации) или как промежуточные. Так, например, создание магнитного поля в катушке намагничивания может рассматриваться как промежуточный результат, необходимый для перемещения сердечника, который при этом разрывает, или замыкает какую-нибудь цепь системы управления *другим объектом*. Тогда в качестве *рабочей функции* ОД следует рассматривать *процесс должного перемещения сердечника* катушки намагничивания, который в каких-либо ситуациях может перестать перемещаться, например, по причине дефекта в самом сердечнике или при разрыве соединительной связи, необходимой для этого перемещения. Таким образом, мы приходим к выводу, что в математической модели ОД должны быть представлены не только параметры процессов в электрической цепи объекта (переменные состояния), но и параметры механического процесса перемещения сердечника. Функция получения магнитного поля катушки при этом начинает играть промежуточную роль, тем не менее, необходимую для выполнения итоговой рабочей функции.

Приведем еще некоторые примеры:

1. В электрическом светильнике электрическая энергия превращается в световую энергию. Рабочей функцией объекта является создание требуемого светового потока в нужном месте на должном расстоянии от светильника;

2. В электродвигателе электрическая энергия превращается в механическую энергию вращательного движения. В качестве рабочей функции можно считать обеспечение нужного числа оборотов при нахождении на валу определенной нагрузки;

3. В датчике ядерного излучения кинетическая энергия частиц, являющихся продуктами радиоактивного распада атомных ядер вещества, превращается в электрическую энергию в виде электрического тока, протекающего через регистрирующий прибор. Величина тока рассма-

тривается в качестве рабочей функции датчика. Остальные величины могут не представлять никакого интереса при оценке технического состояния этого объекта.

В результате данного рассмотрения могут быть сделаны некоторые выводы:

1. Из числа *параметров* (характеристик) *процесса* на принятом уровне детализации какая-то часть будет отнесена к *рабочим функциям*.

2. *Параметр* (характеристика) *процесса* может претендовать на роль *диагностического признака* объекта при условии, если одновременно с ним известен другой параметр (характеристика) *процесса*, позволяющий вместе с первым *идентифицировать* параметр *структурного элемента объекта*.

В последнем случае в качестве такого параметра берется величина тока, протекающего через элемент, если одновременно с ней контролируется величина напряжения на данном элементе на предмет ее соответствия номинальному значению. Такой *параметр процесса* может рассматриваться как *косвенный диагностический признак* объекта. Или же на основе знания обоих *параметров процесса* может быть вычислен *структурный параметр* объекта, который в этом случае выступает в роли *прямого диагностического признака* объекта. В случае *нелинейного* резистивного элемента в качестве такого прямого диагностического признака обычно рассматривается *вольтамперная характеристика* этого элемента, при построении которой по осям координатной системы откладываются соответствующие значения обоих параметров процесса (тока и напряжения).

4. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ И ФУНКЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТА

После того как на приемлемом уровне детализации построена структурная схема диагностируемого объекта и определены параметры получившихся структурных единиц (структурные параметры), часть из них может претендовать на роль диагностических признаков и, таким образом, отвечать за изменение технического состояния объекта при его эксплуатации. Что следует понимать под приемлемым уровнем? Как было уже отмечено, не следует увлекаться и дробить объект на излишне мелкие части, поскольку в случае ремонта проще и дешевле целиком заменить отдельные блоки, а не их элементы. Это *нижняя граница уровня детализации* при диагностировании объекта.

С другой стороны, параметры структурных единиц должны как можно проще отражать суть физических процессов в этих СЕ. Тогда при измерении параметров процессов проще и понятнее на основе известных законов выполнить идентификацию структурных параметров и, следовательно, ДП объекта.

Помимо, диагностических признаков и рабочих функций объекта в целях его безопасности следует рассмотреть еще один класс функций, ко-

торые можно было бы охарактеризовать как *функции безопасности* ОД. О чем идет речь. Представим себе, что при нахождении объекта в рабочем состоянии от него требуют не только выполнение возложенных на него рабочих функций, но и сохранение каких-то величин в заданных пределах. В этом случае выполняются условия для безопасной эксплуатации контролируемого объекта. В качестве контролируемых величин могут выступать конструктивные параметры объекта или же некоторые функциональные зависимости.

Приведем примеры таких величин:

- наличие небольшой трещины в каком-то трубопроводе не приводит (и возможно не приведет в дальнейшем) к нарушению рабочих параметров перекачиваемой среды (давление, расход, температура и т. д.). Однако выход какой-то части этой среды за пределы трубопровода может создать аварийную обстановку, которую следует предотвратить;

- наличие какого-то шума или уровня вибрации на работающей установке не влияет на выполняемые рабочие функции. Однако превышение этих величин по заданному предельному уровню создает недопустимую обстановку для окружающих и возможную опасность для самой установки, например, в случае нарастания уровня вибраций, по причине дальнейшей разбалансировки ротора;

- нарастание нейтронной мощности (нейтронного потока) в активной зоне ядерного реактора с недопустимой скоростью может привести к аварийной обстановке на АЭС. В лучшем случае это приведет к сбросу стержней аварийной защиты со всеми вытекающими последствиями.

В приведенных примерах разные по своей природе величины (параметры и зависимости) выступали в роли функций безопасности. Причины их возникновения также разные.

В первом примере – это, возможно, качество металла или сварки.

Во втором – некачественная сборка на этапе пуско-наладочных работ.

В третьем примере – неправильные режимы управления или «человеческий фактор».

Подводя итог проведенному рассмотрению, сделаем следующий вывод: при диагностировании помимо контроля ДП или *рабочих функций* объекта следует контролировать ряд функций, отнесенных к числу *функций безопасности*.

Справедливости ради следует заметить, что в первом примере с трубопроводом функция безопасности вырождается в структурный параметр объекта, который можно контролировать как еще один диагностический признак, например, по критериям допускового контроля. Другими словами, в функциях безопасности может иметь место сочетание величин, связанных с параметрами (характеристиками) процесса и со структурными параметрами (диагностическими признаками). Это еще раз говорит о тесной связи этих величин в процессе диагностирования технических объектов.

После того как при заданном уровне детализации определены основной набор *структурных параметров* объекта и набор его *рабочих функций*

необходимо из числа структурных параметров объекта выделить те, которые в процессе эксплуатации ОД следует рассматривать как *диагностические признаки* объекта. Связано это с тем, что не все полученные структурные параметры объекта будут в равной или достаточно высокой степени влиять на выполнение объектом своих рабочих функций. Если со стороны каких-то структурных параметров влияние на каждую из выделенного набора рабочую функцию оценивается как незначительное, то такие структурные параметры объекта не включаются в число его диагностических признаков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены положения *методологии диагностирования* непрерывных технических объектов и рассмотрены вопросы, которые необходимо решать при реализации этой методологии на практике. В то же время нужно отметить, что сложных технических объектов, для которых выполняется диагностирование во время эксплуатации, существует достаточно большое количество, но еще большее количество может быть методов диагностирования этих объектов. Для успешного создания современной системы диагностирования необходим совместный труд трех групп специалистов: конструкторов данного вида оборудования, специалистов по технической диагностике и эксплуатационного персонала, имеющего опыт работы с подобным оборудованием. Эти и другие вопросы отражены в *концепции* создания автоматизированных систем диагностирования [4]. В результате реализации изложенного там подхода, разработки более совершенного диагностического обеспечения, будет возможно создание новых более эффективных и экономичных систем диагностирования 21 –го века [5].

Литература

1. Панкин А.М. К созданию малогабаритной системы диагностирования электронных, электротехнических блоков на основе методики диагностирования электрических цепей // Бюл. II –й науч.-техн. конф. «Создание новой техники для АЭС. Импортзамещение». Сочи. 19-23.05.2003. – М., 2003. – С. 75-83.
2. Калявин В.П., Панкин А.М. Основы теории надёжности и технической диагностики элементов и систем ЯЭУ. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского гос. политехнического ун-та, 2007. – 213 с.
3. Панкин А.М. Об основных понятиях технической диагностики // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 10. – С. 38-45.
4. Панкин А.М. Введение в теорию диагностирования электротехнических систем. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 264 с.
5. Панкин А.М. Создание систем диагностирования для объектов атомной энергетики // Ядерные измерительно-информационные технологии. – 2013. – № 4. – С. 22-32.

Информация об авторе

Панкин Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГУП «Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова»; доцент Института Ядерной Энергетики (филиал) Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого,», +7 (813) 696 01 94, alpank@niti.ru
Копорское шоссе, д. 72, Сосновый Бор, Ленинградская область, 188540, Россия

METHODOLOGY FOR DEVELOPMENT OF DIAGNOSTIC SYSTEMS IN NUCLEAR POWER INDUSTRY

*A.M. Pankin, PhD, Associate Professor,
Alexandrov Research Institute of Technology,
Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia*

Abstract. *The main goal of technical equipment design is to ensure its reliability all the way through equipment lifecycle. This goal is achieved by the development of diagnostic system (DS) along with other corresponding approaches. One of the most important aspects is the development of diagnostic system for technical equipment and facilities related to the safety of population.*

Nowadays the crucial task for technical equipment diagnostics is assessment of actual equipment state at the time of diagnosing, and the proposed methodology is oriented to solve this task.

In order to develop the effective diagnostic system, it is necessary to consider a number of issues and their solutions presented in this paper. Diagnosing procedure and estimating of controlled equipment state lead to the problem of residual life assessment and life management.

Keywords: *technical diagnostics, diagnosis system, technical condition monitoring.*

References

1. A.M. Pankin. Development of portable diagnostic system of electronic and, electrotechnical units based on on the basis of diagnostic method for electric circuitsю *Bulletin of the 2nd scientific and technical conference «Development of the new equipment for the NPP. Import substitution». Sochi. 19-23.05.2003.* Moscow, 2003, pp. 75-83. (In Russ.).
2. V.P. Kalyavin, A.M. Pankin. Foundations of reliability and technical diagnostics of NPP components and systems. Saint Petersburg. Publication of Polytechnic Institute, 2007. 213 p. (In Russ.).
3. A.M. Pankin. Basic concepts of technical diagnostics. *Kontrol'. Dtagnostika – Monitoring. Diagnostics.* 2010, no.10, pp. 38-45. (In Russ.).
4. A.M. Pankin. Introduction to theory of electric engineering systems diagnosing. Saint Petersburg. Publication of Polytechnic Institute, 2012, 264 p. (In Russ.).
5. A.M. Pankin. Development of diagnostic systems for nuclear power plants. *Yadernye informatsionno-izmeritel'nye tekhnologii – Nuclear Information and Measuring Technologies.* 2013, no. 4, pp. 22-32. (In Russ.).

Information about author

Pankin Alexandr Mikhaylovich – PhD, Associate Professor, Leading Reaserch Scientist of Federal State Unitary Enterprise «Alexandrov Research Institute of Technology»; Associate Professor of Nuclear Energy Institute, Branch of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University;: +7 (813) 696 01 94, alpank@niti.ru
72, Kопorskoe Shosse, Sosnowy Bor, Leningradskaya Obl., 188540, Russia



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ВНЕДРЕНИЮ РАЗРАБОТОК ИМАШ РАН И ОКАЗАНИЮ УСЛУГ ПО
ПРОВЕДЕНИЮ НИР И НИОКР СТОРОННИМ ОРГАНИЗАЦИЯМ**

**ПРЕДЛОЖЕНИЕ УСЛУГ ПО ПРОВЕДЕНИЮ НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ, СЕМИНАРОВ,
СОВЕЩАНИЙ, ТРЕНИНГОВ, ПЕРЕГОВОРОВ, ПРЕЗЕНТАЦИЙ И ДРУГИХ ДЕЛОВЫХ
И УЧЕБНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ**

[http:// www.imash.ru](http://www.imash.ru)