

## ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**А. М. Панкин**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия  
alpank@niti.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассмотрены основные этапы разработки алгоритмов контроля технического состояния сложных объектов, для которых предполагается создание систем диагностирования нового поколения. *Материалы и методы.* Ранее создаваемые системы диагностирования в основном ориентировались на решение задач неразрушающего контроля, которые не позволяют в достаточной мере выполнять оценку остаточного ресурса контролируемых объектов. *Результаты и выводы.* Также представлен один из алгоритмов решения задачи поиска дефекта при анализе возможной неисправности объекта, представляемого электрической цепью. Метод основан на переборе возможных топологических графов цепи при построении математических моделей объекта с разными видами дефектами.

**Ключевые слова:** технический объект, контроль, диагностирование, техническое состояние, диагностический признак, математическая модель, диагностическая модель, дефект, электрическая цепь

**Для цитирования:** Панкин А. М. Основные вопросы методологии диагностирования сложных технических объектов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 62–69. doi:10.21685/2307-4205-2021-2-6

## THE MAIN ISSUES OF THE DIAGNOSTIC METHODOLOGY COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

**A.M. Pankin**

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia  
alpank@niti.ru

**Abstract.** *Background.* The article discusses the main stages in the development of algorithms for monitoring the technical state of complex objects, for which it is planned to create a new generation of diagnostic systems. *Materials and methods.* Previously created diagnostic systems were mainly focused on solving the problems of non-destructive testing, which do not allow sufficient assessment of the residual life of the controlled objects. *Results and conclusions.* The article also presents one of the algorithms for solving the problem of finding a defect when analyzing a possible malfunction of an object represented by an electrical circuit. The method is based on enumeration of possible topological graphs of a chain when constructing mathematical models of an object with different types of defects.

**Keywords:** technical object, control, diagnostics, technical condition, diagnostic feature, mathematical model, diagnostic model, defect, electrical circuit

**For citation:** Pankin A.M. The main issues of the diagnostic methodology complex technical objects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;2:62–69. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-2-6

### Введение

В методологии предлагается рассмотрение следующих вопросов:

- 1) диагностирование при отсутствии информации о структуре контролируемого объекта;
- 2) построение математической модели и определение диагностических признаков объекта;
- 3) построение диагностической модели объекта;
- 4) определение функций работоспособности и функций безопасности объекта;

- 5) оценка информативности диагностических измерений и прогнозирование остаточного ресурса;
- 6) моделирование возможных дефектов структурных элементов объекта и топологические изменения математической модели.

### Диагностирование при отсутствии информации о структуре контролируемого объекта

При создании систем диагностирования объектов атомной энергетики и других ответственных объектов техники предполагается наличие математических моделей контролируемых объектов. Для менее ответственных объектов вопрос создания систем диагностирования может не ставиться, поскольку создание таких систем является достаточно затратным делом и требует не только финансовых ресурсов, но и привлечения к этой работе подготовленных специалистов. Такие специалисты целенаправленно не готовятся. Если предположить, что информация о структуре объекта отсутствует [1], то в качестве математической модели процессов в контролируемом объекте предлагается рассматривать коэффициенты передачи или передаточные функции, связывающие входные воздействия, подаваемые на объект в режиме рабочего функционирования, и выходные реакции объекта на эти воздействия. Для получения такой модели требуется измерительная информация, получаемая при работе объекта в штатном или тестовом режиме функционирования, когда подаваемые входные воздействия отличаются от номинальных значений. Последний режим необходим в случае нелинейных зависимостей между рассматриваемыми величинами. При последовательном проведении диагностических измерений в процессе эксплуатации отслеживается изменение коэффициентов передачи объекта. При приближении функций работоспособности к предельным значениям объект может перейти в неработоспособное состояние. Платой за отсутствие информации о структуре объекта и отсутствие полноценной математической модели процессов, имеющих место в контролируемом объекте при отработке им заданного ресурса, является невозможность с требуемой точностью предсказания момента времени, когда объект перейдет в неработоспособное состояние. Связано это с возможным немонотонным характером в изменении контролируемых величин.

### Построение математической модели и определение диагностических признаков объекта

Создание такой модели [2], основанной на известных законах природы, необходимо для получения диагностической модели объекта и формирования набора его диагностических признаков<sup>1</sup>. В качестве диагностических признаков (ДП) будем рассматривать некоторые структурные параметры или характеристики объекта, при нахождении которых в соответствующих диапазонах объект сохраняет работоспособное состояние по выполняемым функциям [3]. При приближении ДП к границам допустимых для работоспособного состояния областей объект диагностирования приближается к своему предельному состоянию, а его остаточный ресурс приближается к нулю.

Рассмотрим математическую модель объекта, связывающую векторы выходных реакций  $\vec{Y}$  и входных воздействий  $\vec{X}$  в виде  $\vec{Y} = \hat{A}\vec{X}$ , где в состав матрицы  $\hat{A}$  входят структурные параметры объекта, часть из которых отнесем к разряду диагностических признаков  $\vec{Z}$ . Изменение ДП происходит со временем и зависит от внешних факторов и режимов работы объекта. При этом могут рассматриваться следующие внешние факторы:

- старение;
- тепловые поля;
- влажность;
- радиация;
- механические воздействия (удары, вибрации).

Выделим эти факторы в отдельную группу  $\vec{F}$  и рассмотрим их влияние на ДП объекта  $\vec{Z}$ . Для этого построим функцию вида  $\vec{Z} = \hat{B}\vec{F}$ .

Рассмотрим задачу изменения  $n$  диагностических признаков под влиянием группы факторов  $\vec{F}$ , общее количество которых равно  $m$ . Будем полагать, что каждый из перечисленных факторов в течение эксплуатации объекта влияет на какое-то одно свойство части объекта или размер между его отдельными частями, изменение которых и приводит к изменению ДП объекта. Определим это

<sup>1</sup> ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. М. : Изд-во стандартов, 1990.

влияние в количественной мере, рассматривая векторную функцию  $\vec{F}(t)$ , значения компонентов которой  $f_i$  изменяются от нуля до максимального значения  $f_i^m$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ . При этом будем получать относительное изменение вектора ДП как временную функцию  $\vec{Z}(t)$ . Относительные изменения компонент вектора  $\vec{Z}$ , соответствующих работоспособному состоянию объекта, будем рассматривать в диапазонах  $(z_i^1, z_i^2)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . При выходе хотя бы одного ДП за соответствующие пределы величина одной или нескольких рабочих функций объекта будет иметь недопустимо малые или большие значения, соответствующие потере объектом работоспособного состояния.

Рассмотрим матрицу коэффициентов чувствительности  $l$  рабочих функций объекта  $\vec{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_l)$  к изменению диагностических признаков  $\vec{Z}$ .

Запишем ее в виде  $\hat{S} = \{s_i^j\}$ , где  $i$  – номер функции ( $i = 1, 2, \dots, l$ ),  $j$  – номер диагностического признака ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Коэффициент чувствительности  $s_i^j$  представим в виде

$$s_i^j = \left\{ \frac{(y_i(t) - y_i^{\text{ном}})}{y_i^{\text{ном}}} \right\} / \left\{ \frac{(z_j(t) - z_j^{\text{ном}})}{z_j^{\text{ном}}} \right\} = \delta y_i(t) / \delta z_j(t). \quad (1)$$

По величинам коэффициентов чувствительности, полученным по математической модели объекта, составляется список потенциальных диагностических признаков объекта, количество которых стараются минимизировать для более эффективной идентификации их в последующих диагностических измерениях.

### Построение диагностической модели объекта

Получение диагностической модели объекта направлено на решение следующей задачи [4]: установить связь между величинами, непосредственно измеряемыми при диагностировании (параметрами процесса) и косвенно определяемыми структурными параметрами объекта, отнесенными к числу его диагностических признаков.

При построении диагностической модели исходной является математическая модель, в которой исключается часть связей между структурными параметрами объекта и параметрами процессов, происходящих в режимах рабочего и тестового диагностирования. В результате такого преобразования в исходной математической модели (ММ) может уменьшиться количество уравнений. Однако при этом преобразовании нельзя исключать ни один ДП из установленного для объекта набора. Должны остаться в модели и все непосредственно измеряемые параметры процесса. Процесс перехода от ММ к диагностической модели может происходить разными путями. Если в ММ присутствуют дифференциальные уравнения, то вначале может выполняться переход от дифференциальных уравнений к алгебраическим путям использования конечно-разностных схем. При этом получается некоторый промежуточный вариант диагностической модели (ДМ). В полученном варианте ДМ количество уравнений и количество неизвестных диагностических признаков должно быть одинаковым, иначе невозможно решение задачи идентификации всех ДП.

Желательно, чтобы на этом этапе процесс трансформации ММ в ДМ не завершился. Конечный вариант диагностической модели хотелось бы получить в виде выражений, в которых определены зависимости каждого из диагностических признаков объекта от непосредственно измеряемых параметров процесса и, возможно, других известных величин.

К числу таких величин относятся и другие структурные параметры объекта, которые не были введены в число его диагностических признаков по разным причинам. После получения указанных соотношений для ДП в явном виде становится возможным не только определять значения диагностических признаков по результатам непосредственных измерений, но и получать оценки погрешностей для этих значений. Величины погрешностей (неопределенностей) зависят от погрешностей непосредственных измерений, а также от ряда других факторов, определяемых в каждом конкретном случае отдельно.

При проведении диагностирования какая-то часть ДП может определяться путем непосредственных измерений. Тогда они вместе с остальными измеряемыми величинами будут входить в ди-

агностическую модель объекта для идентификации оставшихся неизвестных диагностических признаков.

Таким образом, в качестве основного назначения диагностической модели является установление связи в виде полученной аналитической зависимости между неизвестными диагностическими признаками в модели объекта и непосредственно измеряемыми в диагностическом процессе величинами. Она также используется для оценок погрешностей определения этих ДП.

### **Определение функций работоспособности и функций безопасности объекта**

После построения структурной схемы с учетом приемлемого уровня детализации определяют параметры структурных единиц схемы, из которых часть параметров выбирается в качестве ДП объекта.

Приемлемый уровень детализации выбирается исходя из реальных пределов при дроблении объекта на более мелкие части, которые диктуются экономическими соображениями, исходя из которых, контролировать и заменять в случае ремонта объекта проще отдельные блоки, а не отдельные элементы этих блоков. Так мы подходим к *нижней границе*, до которой доходит детализация при создании математической модели контролируемого объекта.

В то же время параметры структуры объекта должны как-то отражать протекающие в них физические процессы. Тогда на основе известных законов природы становится понятным и измерение параметров процесса, протекающего в объекте, и идентификация его структурных параметров на основе измеренных параметров процесса.

При недостатке измерительной информации по непосредственно измеряемым в процессе диагностирования величинам выполняется укрупнение элементов объекта и переход к его новым структурам. При этом понятно, что диагностические признаки новых структур в виде диагностических характеристик будут значительно сложнее диагностических параметров прежней структуры. Это вызывает определенные трудности при нахождении допусковых границ новых ДП и отслеживания в изменениях этих характеристик при эксплуатации объекта.

При определении *верхней границы* детализации структуры объекта желательно получить такую структурную схему, которая включает элементы с параметрами, имеющими простой физический смысл. А также для этой схемы должна быть при диагностировании получена необходимая для идентификации параметров структуры объекта измерительная информация. Тогда отпадает необходимость укрупнения в одну структурную единицу элементов разной физической природы (например, резистор и индуктивность), что значительно усложняет диагностическую характеристику нового ДП.

С параметрами структуры объекта связан вопрос о *рабочих функциях* диагностируемого объекта, которые были определены конструктором изделия на этапе его проектирования. Уже упоминалось, что рабочие функции представляют величины, связанные с протекающими в объекте процессами.

Если такой функцией в объекте электрической природы является мощность, выделяемая, например, в резисторе, то ее можно определить в виде произведения двух параметров электрического процесса: тока и напряжения.

Если рабочей функцией является уже энергия, которая снимается или выделяется в данном элементе цепи, то к двум указанным величинам добавится третья – время. Тогда эта функция будет определяться как интеграл от указанного произведения по времени, если подинтегральная величина не будет постоянной на интервале интегрирования.

Из этих примеров уже видно, какое количество и разнообразие рабочих функций может рассматриваться. И с рассмотрением новых объектов это количество и их спектр будут только увеличиваться и расширяться. Поэтому к определению количества и номенклатуры рабочих функций следует переходить после определения конкретного объекта диагностирования, так как создание алгоритмов диагностирования требует значительных средств.

В то же время даже при рассмотрении алгоритмов диагностирования в общем виде следует принимать во внимание еще один класс функций, которые определим как *функции безопасности* объекта. При рассмотрении ряда объектов диагностирования (ОД) можно выделить в них такие элементы структуры, которые не оказывают существенного значения на выполнение объектом определенных для него рабочих функций. Однако изменение параметров этих элементов может привести к ситуации, когда режим штатного функционирования должен быть остановлен вследствие возмож-

ных тяжелых последствий как для самого объекта, так и для его возможного окружения, в том числе и людей.

Допустим, в электрической цепи есть участок, представляющий параллельное соединение двух и более резисторов. Если одна из ветвей оказалась разорванной, то через оставшиеся резисторы пойдет ток большей величины. Это возможно не окажет заметного влияния на выполнение объектом своих рабочих функций, однако дополнительное тепловыделение в оставшихся элементах за счет возросшего тока может привести к полному разрыву этого участка цепи за счет «лавины отказов». В результате получим отказ по всем рабочим функциям объекта с возможными последствиями для окружающих объектов. Этот пример показывает, что в структуре объекта диагностирования должны определяться элементы и соединения, которые играют роль «слабого звена», отказ которого должен приводить к остановке ОД, даже при штатном функционировании.

Возьмем другой пример. При изменении состояния сварного шва на каком-то участке трубопровода могут не изменяться параметры процесса по перемещению вещества в нем. Трубопровод при этом продолжает выполнять возложенные на него рабочие функции (например, по пропускной способности). Однако при дальнейшей разгерметизации трубопровода может возникнуть аварийная обстановка со всеми вытекающими последствиями. Понятно, что после ее возникновения данный объект не рассматривается как находящийся в работоспособном состоянии.

Подведем итог и сделаем следующий вывод: в процессе диагностирования должен выполняться контроль параметров структуры, не только связанных с рабочими функциями объекта, но и следует выполнять контроль тех параметров структуры, которые связаны с обеспечением безопасности объекта (*функции безопасности*).

Отметим, что в последнем примере функция безопасности представляется структурным параметром объекта. Этот параметр может контролироваться как дополнительный диагностический признак объекта. Иначе говоря, в функциях безопасности сочетаются величины, связанные как с параметрами процесса, так и со структурными параметрами объекта, что говорит о наличии тесной связи между этими величинами при диагностировании. При построении методологии контроля технического состояния рассматриваются разные подходы [5].

### **Оценка информативности диагностических измерений и прогнозирование остаточного ресурса**

При проведении диагностирования используются измерительные приборы, а также информационно-измерительные системы [6], дающие результаты измерений с какой-то погрешностью. При переходе с помощью диагностических моделей от непосредственно измеряемых величин к контролируемым параметрам (диагностическим признакам) к погрешности результатов непосредственных измерений добавится компонента погрешности, связанная с этим переходом. Величина итоговой погрешности приобретает особое значение при приближении диагностического признака к своим предельным значениям, поскольку в зависимости от полученной величины погрешности этого параметра может быть поставлен тот или иной диагноз. Для того, чтобы разобраться с величиной получаемой итоговой погрешности идентифицируемого диагностического признака, нужно учитывать погрешность измерения определяемой при диагностировании величины и трансформацию этой погрешности при переходе к конкретному ДП объекта по его диагностической модели. Если для определения одного и того же ДП могут быть использованы измерения разных величин, позволяющих определить техническое состояние объекта, то с учетом сказанного будут получаться разные итоговые погрешности в процедуре оценки этого диагностического признака. В итоге мы приходим к выводу, что из перечисленных возможных измерений какого-то набора величин, измерение одной величины позволяет получить данный ДП с минимальной погрешностью. Таким образом, возникает необходимость во введении того или иного численного критерия [7] для оценки степени полезности данного измерения для повышения вероятности правильной постановки диагноза о том или ином техническом состоянии объекта безотносительно к тому, какое это состояние (например, при выборе из двух возможных: работоспособное, неработоспособное). Для этого вводится понятие информативности конкретного измерения при его использовании для идентификации конкретного ДП на основе полученной диагностической модели объекта.

Информативность отдельного измерения для целей диагностирования объекта определяется как величина, оценивающая вероятность правильной постановки диагноза о техническом состоянии объекта по диагностическому признаку, определенному по данному измерению.

В качестве количественной оценки информативности измерения предлагается использовать коэффициент информативности, изменяющийся так же, как и величина вероятности, в пределах от 0 до 1. Отличие этого коэффициента от вероятности в том, что он не привязан к оценке вероятности того или иного исхода при диагнозе технического состояния объекта. Практическое значение во введении такой величины обусловлено возможностью выбора на этапе проектирования объекта контрольных точек для подключения измерительной аппаратуры на этапе эксплуатации этого же объекта с целью определения диагностических признаков с меньшей погрешностью, а постановки диагноза о состоянии объекта по этому признаку с большей вероятностью.

На основе проведенного анализа возможных ситуаций [4] можно заключить следующее:

1. Вероятность правильного заключения о техническом состоянии объекта в ряде случаев определяется не точностью проводимых измерений, а соотношением между границами двух интервалов:

- интервала работоспособного состояния;
- интервала, который устанавливает неопределенность измеренной величины (в котором находится неизвестное истинное значение).

2. Об информативности того или иного диагностического измерения можно судить по величине коэффициента информативности, определяемого, например, по формуле

$$I_i = \frac{A_i \left| P_{1i} - \frac{1}{2} \right|}{\left| P_1^0 - \frac{1}{2} \right| + 1} = \frac{A_i \left| P_{2i} - \frac{1}{2} \right|}{\left| P_2^0 - \frac{1}{2} \right| + 1}, \quad (2)$$

где  $P_1^0, P_2^0$  – априорные вероятности нахождения объекта в технически исправном и неисправном состояниях;  $P_{1i}, P_{2i}$  – апостериорные вероятности нахождения объекта в технически исправном и неисправном состояниях по результатам  $i$ -го измерения;  $A_i$  – нормировочный коэффициент, который переводит величину информативности  $i$ -го диагностического измерения в интервал значений  $0 \leq I_i \leq 1$ .

Определяющей величиной в формуле (2) является степень отклонения вероятности нахождения в работоспособном состоянии или вероятности для альтернативного состояния от 0,5 при наличии двух возможных гипотез о техническом состоянии.

Возможны и другие оценки величины информативности  $I_i$ . Для этого в коэффициент  $A_i$  требуется ввести дополнительную информацию о соотношениях между длинами интервалов значений диагностического параметра, допустимых для работоспособного (технически исправного) состояния и интервала неопределенности для этого параметра по результатам того или иного диагностического измерения или между границами указанных интервалов.

3. Существенным моментом можно считать рассмотрение максимальной величины погрешности измерения на основе того или иного закона распределения вероятности случайной величины. Особенно важно это в той ситуации, когда значение измеренной величины приближается к границам интервала значений параметра, допустимых для исправного состояния элемента или объекта. Тогда повышается вероятность появления ошибок первого и второго рода.

Величина информативности диагностического измерения оценивается по значению коэффициента информативности, который вычисляется, например, по формуле (2) и изменяется в некотором диапазоне положительных значений (0; 1). Как было отмечено, коэффициент  $A_i$  в формуле (2) – некоторый нормировочный коэффициент. Если эту формулу модифицировать, то ее можно применить для задачи прогнозирования остаточного ресурса контролируемого объекта. При этом для определения величины информативности (коэффициента информативности) измерений вместо формулы (2) предлагается использовать формулу (3)

$$I_i = \frac{A_p A_i \cdot \left| P_{1i} - \frac{1}{2} \right|}{\left| P_1^0 - \frac{1}{2} \right| + 1}, \quad (3)$$

в которой коэффициент  $A_p$  (коэффициент прогноза) рассчитывается по формуле

$$A_p = 1 - b_0 |R - R^n| / \Delta. \quad (4)$$

В формуле (4):  $\Delta$  – один из двух возможных допусков на значение контролируемого параметра (верхний допуск  $\Delta^+$ , нижний допуск  $\Delta^-$ );  $R^n$  – номинальное значение, задаваемое для измеряемого параметра  $R$ ;  $b_0$  – коэффициент, задаваемый в пределах  $0,5 \leq b_0 < 1$ .

При прогнозировании технического состояния могут использоваться и другие подходы [8].

### **Моделирование возможных дефектов структурных элементов объекта и топологические изменения математической модели**

Ранее рассмотренные вопросы относились к таким задачам технической диагностики, как контроль технического состояния (КТС) объекта и прогнозирование его остаточного ресурса. В том случае, если по результатам КТС объект находится в технически неисправном (неработоспособном) состоянии возникает необходимость в решении еще одной задачи: поиск неисправности. В данной методологии для решения этой задачи предлагается использование семейства математических моделей контролируемого объекта для проведения имитационного моделирования возможных неисправностей. Для объектов электротехнического назначения [9–12], которые рассматривались в данной работе, внесение дефектов выполнялось путем моделирования возможных разрывов и коротких замыканий между отдельными элементами исходной схемы электрической цепи контролируемого объекта. В результате такого изменения связей между элементами схемы изменялась топология электрической цепи. Это отражалось при построении топологического графа новой цепи и, как следствие, на основе законов Кирхгофа, изменялась математическая модель объекта, по которой при заданных номинальных входных воздействиях оценивалось изменение рабочих функций и функций безопасности объекта. Путем перебора возможных новых связей между отдельными частями контролируемого объекта и возможных разрывов между исходными связями создается семейство математических моделей, из которого только некоторая часть имеет право на рассмотрение при практической реализации. Для этой части фиксируются значения рабочих функций, которые рассматриваются при поиске возможных дефектов. При программировании алгоритма поиска вся задача сводится к введению в программу набора матриц главных сечений (или информационных матриц) и проведению вариантного расчета электрической цепи с разными матрицами, что представляет не сложную задачу при наличии соответствующей программы. Для поиска дефектных элементов может рассматриваться ряд других подходов [13].

### **Список литературы**

1. Панкин А. М. Диагностирование электрических цепей при неизвестной топологии схемы // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2002. С. 425–427.
2. Калявин В. П., Панкин А. М. Основы теории надежности и технической диагностики элементов и систем ЯЭУ : учеб. пособие. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 213 с.
3. Панкин А. М. Некоторые вопросы методологии диагностирования непрерывных технических объектов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2010. Т. 1. С. 42–48.
4. Панкин А. М. Разработка теории и методов контроля технического состояния изделий и систем атомной энергетики : дис. ... д-ра техн. наук / Панкин А. М. СПб., 2019.
5. Северцев Н. А. Методология сложных систем в обеспечении безопасности и работоспособности // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения выдающегося ученого академика АН СССР (РАН) Всеволода Сергеевича Авдуевского. Елец, 2017. С. 17–29.
6. Юрков Н. К., Прошин А. А., Горячев Н. В. Синтез структуры многоканальной информационно-измерительной системы // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 3. С. 64–71.
7. Гаскаров Д. В. [и др.]. Выбор информативных параметров при контроле качества изделий электронной техники. Л. : ЛДНТП, 1979. 32 с.
8. Жаднов В. В. Анализ методик прогнозирования межповерочных интервалов электронных измерительных приборов // Мир измерений. 2016. № 2. С. 24–36.
9. Башарин С. А., Федоров В. В. Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля : учеб. пособие. М. : АСАДЕМА, 2004. 304 с.
10. Диагностика и идентификация электрических цепей : межвуз. сб. науч. тр. / отв. ред. Н. В. Киншт. Владивосток : ДВПИ, 1989. 172 с.
11. Korovkin N. V., Selina E. E. An efficient method of wave processes in transmission simulation using discrete models // IEEE EMC Symp. 1998. Vol. 2. P. 946–951.

12. Кофанов Ю. Н. Методы теории параметрической чувствительности радиоэлектронных средств : учеб. пособие. М. : Моск. ин-т электронного машиностроения, 1991. 174 с.
13. Иванов И. А., Конашенкова А. Ю., Лышов С. М., Увайсов С. У. Оценка достоверности выявления дефектов печатного узла с использованием встроенных эмуляторов генерации вибрационных колебаний // Качество. Инновации. Образование. 2016. № 11. С. 55–60.

### References

1. Pankin A.M. Diagnostics of electrical circuits with an unknown circuit topology. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2002;425–427. (In Russ.)
2. Kalyavin V.P., Pankin A.M. *Osnovy teorii nadezhnosti i tekhnicheskoy diagnostiki elementov i sistem YaEU: ucheb. posobie = Fundamentals of the theory of reliability and technical diagnostics of elements and systems of nuclear power plants : textbook*. Saint-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007:213. (In Russ.)
3. Pankin A.M. Some questions of the methodology for diagnosing continuous technical objects. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2010;1:42–48. (In Russ.)
4. Pankin A.M. Development of the theory and methods of monitoring the technical condition of nuclear power products and systems. DSc dissertation. Saint-Petersburg, 2019. (In Russ.)
5. Severtsev N.A. Methodology of complex systems in ensuring security and operability. *Fundamental'no-prikladnye problemy bezopasnosti, zhivuchesti, nadezhnosti, ustoychivosti i effektivnosti sistem: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 95-letiyu so dnya rozhdeniya vydayushchegosya uchenogo akademika AN SSSR (RAN) Vsevoloda Sergeevicha Avdujevskogo*. Elez, 2017:17–29. (In Russ.)
6. Yurkov N.K., Proshin A.A., Goryachev N.V. Synthesis of the structure of a multi-channel information and measurement system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):64–71. (In Russ.)
7. Gaskarov D.V. [et al.]. *Vybor informativnykh parametrov pri kontrole kachestva izdeliy elektronnoy tekhniki = Selection of informative parameters for quality control of electronic equipment products*. Leningrad: LDNTP, 1979:32. (In Russ.)
8. Zhadnov V.V. Analysis of methods for predicting the calibration intervals of electronic measuring devices. *Mir izmereniy = The world of dimensions*. 2016;(2):24–36. (In Russ.)
9. Basharin S.A., Fedorov V.V. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Teoriya elektricheskikh tsepey i elektromagnitnogo polya: ucheb. posobie = Theoretical foundations of electrical engineering. The theory of electric circuits and the electromagnetic field: a textbook*. Moscow: ACADEMA, 2004:304. (In Russ.)
10. Kinsht N.V. (ed.). *Diagnostika i identifikatsiya elektricheskikh tsepey: mezhvuz. sb. nauch. tr. = Diagnostics and identification of electrical circuits : interuniversity collection of scientific papers*. Vladivostok: DVPI, 1989:172. (In Russ.)
11. Korovkin N.V., Selina E.E. An efficient method of wave processes in transmission simulation using discrete models. *IEEE EMC Symp*. 1998;2:946–951.
12. Kofanov Yu.N. *Metody teorii parametricheskoy chuvstvitel'nosti radioelektronnykh sredstv: ucheb. posobie = Methods of the theory of parametric sensitivity of radio-electronic means : a textbook*. Moscow: Mosk. in-t elektronnoy mashinostroeniya, 1991:174. (In Russ.)
13. Ivanov I.A., Konashenkova A.Yu., Lyshov S.M., Uvaysov S.U. Evaluation of the reliability of detecting defects in the printing unit using built-in emulators for generating vibration vibrations. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie = Quality. Innovations. Education*. 2016;(11):55–60. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Александр Михайлович Панкин

доктор технических наук, доцент,  
доцент высшей школы атомной и тепловой энергетики,  
Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)  
E-mail: alpank@niti.ru

#### Alexander M. Pankin

Doctor of technical sciences, associate professor,  
associate professor of Higher School of Nuclear  
and Thermal Power Engineering,  
Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University  
(29 Polytechnicheskaya street, St. Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 02.04.2021**

**Поступила после рецензирования / Revised 15.04.2021**

**Принята к публикации / Accepted 17.04.2021**