

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЦЕЛЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

А. М. Панкин<sup>1</sup>, А. А. Калютик<sup>2</sup>, Д. В. Лялюев<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия  
<sup>3</sup> Научно-исследовательский технологический институт имени А. П. Александрова,  
Сосновый Бор, Ленинградская область, Россия  
<sup>1</sup> alpank@niti.ru, <sup>2</sup> Kalyutik@yandex.ru, <sup>3</sup> ldv@niti.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассмотрено построение математических моделей контролируемых объектов на основе фундаментальных законов классической механики для решения основной задачи технической диагностики – определения технического состояния. *Материалы и методы.* На основе математической модели строится диагностическая модель. Такой подход выводит на определение рабочих функций объекта и получение критериев оценки работоспособности, необходимых для определения остаточного ресурса. Уточняется понятие диагностического признака объекта, подлежащего идентификации в процессе диагностирования. *Результаты и выводы.* В данной статье рассмотрены вопросы технической диагностики ограничено объектами механической природы.

**Ключевые слова:** математическая модель, диагностическая модель, технический объект, техническое состояние, физические законы, движение, скорость, сила, импульс силы, работа, энергия, диагностирование, рабочая функция, диагностический признак

**Для цитирования:** Панкин А. М., Калютик А. А., Лялюев Д. В. Математическое моделирование энергомеханических систем в целях определения их технического состояния // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 34–43. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-5

## MATHEMATICAL MODELING OF ENERGOMECHANICAL SYSTEMS FOR THE PURPOSE OF DETERMINING THEIR TECHNICAL STATE

A.M. Pankin<sup>1</sup>, A.A. Kalyutik<sup>2</sup>, D.V. Lyalyuev<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia  
<sup>3</sup> A. P. Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia  
<sup>1</sup> alpank@niti.ru, <sup>2</sup> Kalyutik@yandex.ru, <sup>3</sup> ldv@niti.ru

**Abstract.** *Background.* The article discusses the construction of mathematical models of controlled objects based on the fundamental laws of classical mechanics for solving the main problem of technical diagnostics – determining the technical condition. *Materials and methods.* A diagnostic model is built on the basis of a mathematical model. This approach leads to the definition of the working functions of the object and the receipt of criteria for assessing the performance required determining the residual resource. The concept of a diagnostic feature of an object to be identified in the process of diagnostics is clarified. *Results and conclusions.* In this article, consideration of the issues of technical diagnostics is limited to objects of a mechanical nature.

**Keywords:** mathematical model, diagnostic model, technical object, technical condition, physical laws, motion, speed, force, impulse of force, work, energy, diagnostics, working function, diagnostic feature

**For citation:** Pankin A.M., Kalyutik A.A., Lyalyuev D.V. Mathematical modeling of energomechanical systems for the purpose of determining their technical state. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):34–43. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-5

При создании технических объектов на этапе проектирования должна быть предусмотрена их надежность в процессе эксплуатации. Выбираются такие конструкторские решения, при которых изменения конструктивных параметров объекта, к которым относятся размеры и свойства отдель-

ных частей и элементов объекта, в процессе заданного срока эксплуатации могут быть в допустимых пределах. При таком изменении параметров структуры конструктор рассчитывает на выполнение объектом предназначенных ему рабочих функций. Для того чтобы подойти к пониманию, что это такое, необходимо однозначное определение и толкование основных понятий теории надежности и технической диагностики [1]. На основе таких определений строятся алгоритмы диагностирования, реализуемые в программном обеспечении новых систем технического диагностирования [2].

### **Основные понятия и определения, используемые при определении технического состояния**

**Надежность** – свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения его эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям применения объекта, его технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования.

При этом объект должен быть **работоспособным**.

#### **Основные факторы, влияющие на надежность изделий.**

К основным факторам, влияющим на надежность технических объектов, относятся: старение, тепловые поля, влажность окружающей среды, солнечная и иная радиация, механические воздействия и режимы работы.

Основные факторы можно разделить на две группы: **субъективные и объективные**.

К субъективным факторам относятся ошибки персонала вследствие нарушения инструкций по эксплуатации и другой эксплуатационной документации.

Объективные факторы разделяются на **внутренние** факторы, возникающие вследствие старения и износа, и **внешние** факторы [1].

Причиной старения являются физико-механические процессы, происходящие в элементах изделий и оборудования, в силу которых эти изделия и системы начинают чаще отказывать. Износ возникает в машинах и механизмах, в которых имеются трущиеся детали.

**Тепловые поля** могут быть созданы как воздействием внешней среды (солнечная энергия и ближайшие объекты, излучающие тепло), так и отдельными элементами самого объекта, излучающими теплоту в процессе работы.

**Влажность** является одним из наиболее сильно воздействующих на технические объекты факторов. При повышенной влажности происходит ускоренное разрушение лакокрасочных покрытий, нарушение герметизации и заливок, электрической прочности радиоэлементов, окисление контактов.

**Солнечная радиация** приводит к тепловому воздействию и воздействию ультрафиолетовых лучей. Тепловые излучения ухудшают условия охлаждения аппаратуры и способствуют ее местному и общему перегреву. Воздействие ультрафиолетовых лучей приводит к активизации процессов старения.

Такие же факторы проявляются при воздействии на изделия и блоки систем **ядерного излучения**: нагрев и изменение физико-механических свойств материалов.

**Механическое воздействие** – удары и вибрации в процессе эксплуатации могут привести к нарушению целостности паек, контактов, разрушению, крепежных деталей.

**Режим работы** оказывает существенное влияние на надежность элементов, узлов и всего оборудования в целом. Уменьшение фактических нагрузок способствует увеличению надежности.

Перечисленные факторы, как и ряд других [3–4], приводят к уменьшению ресурса изделий и должны учитываться при его проектировании.

**Техническое состояние** – состояние, которое характеризуется в определенный момент времени при определенных условиях внешней среды значениями параметров, установленных технической документацией на объект.

**Диагностическим признаком** (ДП) называется параметр или характеристика, используемые при диагностировании объекта, по которым оценивается техническое состояние объекта диагностирования (ОД). В качестве **параметров** могут использоваться определяемые при диагностировании такие физические величины, как параметры элементов электрической цепи (сопротивления, индуктивности, емкости), время переходного процесса и др. Под **характеристикой** понимается зависимость одной физической величины от другой. При этом характеристики могут быть **статическими**, если величина не зависит от времени, и **динамическими**, если такая зависимость присутствует.

Общим понятием теории надежности и технической диагностики является **работоспособность** контролируемого объекта. Это понятие используется для обозначения класса состояний ОД,

находясь в котором он выполняет свойственную ему *работу*. Однако есть и некоторое отличие в формулировке понятия работоспособного состояния в технической диагностике и теории надежности.

**Работоспособным** называется состояние, при котором значения всех диагностических признаков, характеризующих способность ОД *выполнять заданные функции*, соответствуют установленным требованиям (приведенным в технической документации на объект).

Другие основные понятия технической диагностики, необходимые для разработки алгоритмов определения технического состояния, были ранее представлены в работе [5].

В следующем разделе понятие диагностического признака объекта расширяется при рассмотрении механических объектов на основе известных законов физики и использовании ряда определенных физических величин.

### Анализ законов механики, используемых при построении функций работоспособности технических объектов

Второй закон Ньютона запишем в виде: *ускорение всякого тела прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально массе тела*.

Вспомним понятия некоторых физических величин, используемых в данном законе [6].

В первую очередь это касается понятия *силы*. Ньютонская механика, в рамках которой проводится данное рассмотрение, предлагает понимать под силой  $\vec{F}$  физическую величину, дающую количественную характеристику и *направление воздействия*, оказываемое на данное тело со стороны других тел. При этом тела не обязательно должны находиться в состоянии непосредственного соприкосновения друг с другом. Воздействие, оказываемое на тело со стороны других тел и характеризуемое величиной силы и направлением ее воздействия, может изменить *скорость движения* тела (в том числе и направление первоначального движения) или вызвать его *деформацию*, т.е. изменение размеров.

С учетом приведенной формулировки и введенных обозначений второй закон Ньютона принято записывать в виде

$$\vec{\omega} = d\vec{v}/dt = k\vec{F}/m, \quad (1)$$

где  $k$  – некоторый коэффициент пропорциональности.

Что дает запись закона Ньютона в виде (1)?

Представленное рассмотрение выводит на следующие моменты:

– *состояние тела* можно связать с двумя характеристиками: *местоположением* тела в момент рассмотрения его состояния и *скоростью* его перемещения (величина, направление) в этот же момент времени;

– *воздействующая на тело сила* может не изменить скорость перемещения тела, т.е. придать ему ускорение, но может вызвать его *деформацию*, т.е. изменение его размеров или, иначе говоря, структуры.

Таким образом, к двум введенным характеристикам тела (местоположение, скорость) добавим еще одну – *характеристику формы или структуры* тела. Важно отметить, что эта последняя характеристика также может измениться под воздействием силы, приложенной к телу.

Изменение второй характеристики состояния тела, а именно его скорости (величины направления), будет происходить до тех пор, пока имеет место ускорение  $\vec{\omega}$ , определяемое в соответствии с формулой (1) действием на тело силы  $\vec{F}$ . Отсюда следует, что после прекращения действия силы тело будет продолжать движение с постоянной по величине и направлению скоростью. Следовательно, при этом вторая и третья характеристики не меняются.

Изменение величины и направления скорости  $\vec{v}$  зависит не только от ускорения тела  $\vec{\omega}$ , определяемого в соответствии со вторым законом Ньютона действующей на тело силой  $\vec{F}$ , но и временем  $\Delta t$  этого действия. Как известно, величина произведения  $\vec{F}\Delta t$  в механике получила название *импульса силы*. В случае, если сила  $\vec{F}$  в течение времени ее действия в интервале  $(t_1, t_2)$  не остается постоянной, ее импульс равен

$$\int_{t_1}^{t_2} \vec{F}(t)dt. \quad (2)$$

Подынтегральное выражение можно представить в следующем виде:

$$\vec{F}dt = m d\vec{v} = d(m\vec{v}), \quad (3)$$

что имеет место в случае постоянства массы  $m$  в механике Ньютона.

Известно, что величина  $m\vec{v}$  называется *количеством движения*  $\vec{K}$ , хотя в ряде случаев эта величина под обозначением  $\vec{p}$  фигурирует как импульс [4]. Мы будем ее рассматривать как количество движения  $\vec{K}$ , а величину  $\vec{F}dt$  как *импульс силы*  $\vec{F}$ .

Единство и определенность терминов в *технической диагностике* являются основой успешного создания *алгоритмов диагностирования*.

После этого выражение 2-го закона Ньютона представляется в виде

$$\vec{F}(t) = d\vec{K}/dt. \quad (4)$$

Это дает возможность, определив временную функцию количества движения, определять временную функцию воздействия на тело силы  $\vec{F}(t)$ .

В первую очередь нужно определиться с тем, что понимать под телом как объектом диагностирования, на который может действовать сила  $\vec{F}$ , представляющая входное воздействие на объект для выполнения им рабочих функций, определенных конструктором.

Ранее уже была рассмотрена физическая величина, называемая *массой тела*, которая вводилась как количественная характеристика инертности тела.

Естественно понимать, что масса тела формируется каким-то количеством микрочастиц вещества (атомов, молекул), находящихся в некоторой связи друг с другом.

Эти микрочастицы формируют также *отдельные части* тела, которые могут отличаться между собой некоторыми свойствами (теплопроводность, электропроводность и т.д.).

Степень связи микрочастиц (отдельных частей) может иметь большую или меньшую величину.

При максимальной величине связи воздействие внешней по отношению к телу силы  $\vec{F}$  в *одинаковой степени* проявляется ко всем без исключения микрочастицам (частям) тела. В этом случае поведение тела и, соответственно, его состояние (координаты, скорость) могут описываться на основе введенного в механике понятия *материальная точка*.

О каком физическом объекте может идти речь при таком рассмотрении? По-видимому, наличие более жесткой связи между отдельными частями приводит к относительно небольшому изменению размеров самого тела, его частей при изменении факторов внешней среды (температуры, влажности, давления, радиации, вибраций, внешних сил и т.д.) до определенной величины.

Следствием этого, можно полагать, будет и относительно небольшое изменение формы тела.

Все вышеприведенное подводит нас к такому общеизвестному понятию физического объекта, как *твердого тела*.

Для такой категории физических объектов можно ставить вопрос о какой-то степени сохранения объема тела или его отдельных частей при влиянии на тело вышеуказанных факторов.

В свою очередь это отразится на некотором изменении плотности вещества отдельных частей тела и, как следствие, изменении свойств этих частей.

В итоге мы подходим к возможному изменению *технического состояния* тела за счет изменения его структурных параметров под влиянием внешних и внутренних факторов, указанных выше.

Рассматривая законы механики, будем в первую очередь оценивать влияние на параметры состояния тела приложенной к нему внешней силы  $\vec{F}$ .

При уменьшении имеющейся величины связи между отдельными микрочастицами тела (жидкость, газ) воздействие внешней силы может по-разному проявиться по отношению к отдельным частям этого физического объекта.

Величина связи может быть уменьшена, в том числе и в процессе воздействия приложенной к объекту силы  $\vec{F}$  (например, в случае некоторых деформаций).

Таким образом, снова подходим к такому изменению состояния тела, как *технического объекта*, когда к параметрам состояния, характеризующим тело как нечто целое в виде материальной точки, добавляются параметры, определяющие его внутреннее состояние (внутренние размеры, свойства отдельных частей).

Вернемся ко второму закону Ньютона, который в формулировке (1) представляет случай, когда единственная сила  $\vec{F}$  действует на тело, рассматриваемое в виде материальной точки.

В реальной ситуации, как уже было отмечено, физический объект имеет реальные размеры, может состоять из нескольких частей с разными свойствами, и на него может оказывать воздействие одновременно несколько внешних сил разной природы.

Что касается последнего, то в качестве силы  $\vec{F}$  следует рассматривать равнодействующую силу с определением точки ее приложения.

Для анализа ситуации со сложным объектом (состоящим из двух и более конструктивно оформленных частей [1]) рассмотрим систему, состоящую из  $N$  материальных точек [4], которые будем называть объектами.

В этой системе входящие в нее тела (или части одного тела), представленные материальными точками, могут взаимодействовать как с объектами внутри системы, так и с теми, которые к этой системе не относятся.

С учетом этого силы, действующие на объекты системы, делятся на внутренние силы, возникающие от объектов системы, и внешние силы, действующие на тот же объект системы от объектов за ее пределами.

В случае, если воздействие внешних сил на объекты системы отсутствует, то данная система считается *замкнутой* [4], и для нее имеет место выполнение *закона сохранения количества движения*, представленного в виде: *количество движения для замкнутой системы не изменяется*, т.е.  $d\vec{K}/dt = 0$ . Использование этого закона позволяет при разработке алгоритмов диагностирования получить дополнительные соотношения для идентификации *диагностических признаков* контролируемого механического объекта.

Рассмотрим перемещение некоторого тела под действием силы  $\vec{F}$ , которая сообщает телу ускорение  $\vec{\omega}$ . При этом нужно исходить из того, что сила  $\vec{F}$  может частично или полностью компенсировать действие на тело другой внешней силы. В итоге на тело будет действовать некоторая результирующая внешняя сила, что скажется на величине сообщаемому ему ускорения. Будем исходить из того, что в любом случае имеет место перемещение тела, даже когда  $\vec{\omega} = 0$ , т.е. тело движется с постоянной скоростью.

Как известно, *действие силы  $\vec{F}$  на пути  $s$  в направлении перемещения тела связывают с понятием работы, выполненной данной силой*.

При этом работой является величина, определяемая по формуле

$$A = F_s s = \vec{F} \vec{s}, \quad (5)$$

где  $s$  – величина перемещения;  $F_s$  – проекция силы  $\vec{F}$  на направление перемещения.

В формуле (5) предполагается, что во время всего перемещения  $s$  сила  $\vec{F}$  остается постоянной. В случае, если это условие не выполняется, величина работы будет равна

$$A = \int_s F_s(s) ds. \quad (6)$$

Работа не может быть физически выполнена за время  $\Delta t = 0$ . Следовательно, и величина  $dt$ , вводимая в разделе математики «дифференциальное исчисление», может быть сколь угодно малой, но  $dt \neq 0$ . Поэтому при использовании теории пределов для описания физических процессов нужно использовать иные обозначения при стремлении ряда физических величин к каким-то малым значениям. Это позволит правильно понимать физический смысл определяемых на практике мгновенных значений для многих физических величин.

Иногда говорят, что одни тела могут совершать работу над другими телами. При такой трактовке из рассмотрения физических процессов исчезает такая величина, как *сила*. Поэтому правильнее считать, что сила, генерируемая одними телами, приводит к совершению *работы над другим телом* (в единственном числе). Поскольку вместе с понятием работы вводится и понятие энергии, то, используя введенные выше *параметры технического состояния* тела, можно под энергией тела понимать следующее: *мера такого изменения состояния тела, при котором оно способно при определенных условиях внешней среды создавать импульс силы для возможного совершения работы над другим телом или для его деформации*.

Возможны и другие формулировки. Главной особенностью приведенной формулировки является фиксация состояния объекта (тела), которое должно определяться набором *установленных параметров* объекта при конкретных условиях внешней среды, как это было определено в ГОСТах по технической диагностике.

Если в качестве параметра состояния рассматривать *величину скорости* тела, то при построении алгоритмов диагностирования используется понятие *кинетической энергии*, а в случае рассмотрения *координаты местоположения* тела в потенциальном поле сил – понятие его *потенциальной энергии*. В случае использования обоих параметров состояния объекта рассматривается сохранение *полной механической энергии* или в общем случае его *полной энергии*.

### **Взаимосвязь законов физики и задач технической диагностики в жизненном цикле технического объекта**

Предлагается следующая последовательность событий, связанных с возможным изменением состояния (технического состояния) тела (технического объекта) в процессе его жизненного цикла, происходящего в пространстве и во времени. Основная задача технической диагностики представляется в установлении рабочей функции объекта и диагностических признаков (параметров и характеристик), которые должны определяться при проведении диагностических измерений.

В качестве объекта на данном этапе исследований рассматриваются механические объекты или системы, действие которых определяется законами классической механики.

1. Объект перемещается в пространстве с какой-то постоянной скоростью  $\vec{v}$  (в частности  $\vec{v} = 0$ ) в выбранной системе координат.

2. На объект могут действовать силы:

– поле сил какой-то природы, действие которых не ограничено во времени (например, гравитационное поле);

– силы, возникающие только в процессе изменения состояния тела (например, силы трения);

– импульс силы  $\vec{F}(t)$  от другого тела ограниченной длительности.

3. В случае силы  $\vec{F}(t)$ , действие которой происходит в течение времени  $\Delta t = t_1 - t_2$ , изменение первоначального состояния объекта можно связать:

– с изменением параметров его движения (местоположение, скорость), которые можно охарактеризовать как *внешние* параметры состояния;

– с изменением параметров структуры объекта, которые назовем *внутренними* параметрами состояния.

4. При *перемещении* тела, вызванного действием силы  $\vec{F}(t)$ , возможны следующие ситуации:

– перемещение происходит с постоянной скоростью, т.е.  $\vec{v} = \text{const}$ , если сила  $\vec{F}(t)$ , вызвав начало движения тела (первоначально неподвижного) со скоростью  $\vec{v} > 0$ , в процессе дальнейшего движения была уравновешена другими силами и в итоге результирующая сила  $\vec{F}_1(t) = 0$ ;

– перемещение происходит с некоторым ускорением, под действием результирующей силы  $\vec{F}_1(t) = \vec{F}(t) - \vec{F}_0(t)$ , где  $\vec{F}_0(t)$  – сумма возникших новых сил, противодействующих движению, таких что  $|\vec{F}_1(t)| > 0$ .

Возникает законный вопрос: как оценивать работу, выполненную силой  $\vec{F}(t)$ , по перемещению тела массой  $m$  на расстояние  $s$ ? Что касается механической работы, то в соответствии с формулой (8), ее величина должна быть равна

$$A = \vec{F} \vec{s}.$$

Однако на процесс перемещения тела массой  $m$  на расстояние  $s$  уходит только часть этой работы  $A_0 = \vec{F}_0 \vec{s}$ . В результате этого перемещения изменилось значение координаты местоположения тела.

Другая часть работы  $A_1 = \vec{F}_1 \vec{s}$  может изменить кинетическую энергию тела при условии  $|\vec{F}_1(t)| > 0$  и, соответственно, другой параметр состояния – скорость тела.

Приведем два примера, связанные с решением задач технической диагностики:

1. Под действием силы  $\vec{F}$  тело массой  $m$  должно быть поднято на высоту  $h$  за фиксированное время  $\Delta t$  и после прекращения действия силы должно иметь некоторую скорость  $\vec{v}$ . Рабочей функцией будет набор указанной высоты за фиксированное время и получение на этой высоте требуемой скорости, определяемой из величины  $A_1 > 0$ .

2. Под действием силы  $\vec{F}$  должна быть перемещена заслонка трубопровода на расстояние  $\vec{s}$ . Рабочей функцией является выполнение  $A_0$  за фиксированное время  $\Delta t$ . Штатный режим перемещения будет в случае, если при этом  $A_1 = 0$ . Иначе заслонка совершит удар по части трубопровода.

В обоих примерах на параметры состояния (координата, скорость тела) возможны некоторые допуски, определяемые в том числе условиями безопасного функционирования объекта.

Рассмотрим более подробно решение задачи перемещения заслонки трубопровода системы топливно-энергетического комплекса при его закрытии и причины возможной неработоспособности этого технического объекта.

### Алгоритм перемещения заслонки трубопровода при его закрытии

В этом разделе представлен один из возможных алгоритмов движения заслонки трубопровода, который предлагается для рассмотрения основной задачи технической диагностики – контроль технического состояния этой части трубопровода.

Для решения этой задачи необходимо определить рабочую функцию объекта и те параметры технического состояния объекта, которые в наибольшей степени оказывают влияние на выполнение (или невыполнение) этой рабочей функции.

Рабочую функцию, выполняемую приводом заслонки трубопровода, представим в следующем виде: необходимо переместить тело массой  $m$  на расстояние  $s$  за время  $t_s$  в предположении, что в начальный и конечный моменты времени это тело является неподвижным. Перемещение происходит под действием внешней силы  $F$ , приложенной к этому телу. При движении тела на него действует сила торможения  $F_t$ , препятствующая его перемещению. Будем полагать, что эта сила является переменной и в общем случае зависит от скорости перемещения тела  $v$ , т.е.  $F_t = F_t(v)$ .

Необходимо задать вид функции внешнего воздействия  $F = F(t)$  как функции от времени перемещения заслонки. Для этого весь временной интервал на пути  $s$  разобьем на три участка:  $s_1, s_2, s_3$ , в соответствии с чем данную функцию представим в виде

$$F(t) > F_t(t), \text{ если } 0 \leq t \leq t_1;$$

$$F(t) = F_t(t), \text{ если } t_1 < t < (t_1 + t_2);$$

$$F(t) = 0, \text{ если } (t_1 + t_2) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3),$$

где  $t_1, t_2, t_3$  – время, затрачиваемое на прохождение расстояний  $s_1, s_2, s_3$  соответственно.

С учетом введенных обозначений

$$s = s_1 + s_2 + s_3; t_s = t_1 + t_2 + t_3.$$

Пусть максимальная скорость перемещения заслонки равна  $v_m$ . Такую скорость тело будет иметь в самом конце 1-го участка, на 2-м участке, в самом начале 3-го участка, поскольку

$$\text{на участке } s_1 \text{ ускорение равно } a_1 = \frac{F(t) - F_t(t)}{m}; s_2 \rightarrow a_2 = 0; s_3 \rightarrow a_3 = \frac{-F_t(t)}{m}.$$

Вначале рассмотрим случай, когда действующие на тело силы являются **постоянными по величине**.

Тогда  $a_1 = \text{const}; a_3 = \text{const};$

$$v_m = a_1 t_1; v_m = a_3 t_3; s_1 = \frac{a_1 t_1^2}{2}; s_2 = v_m t_2; s_3 = \frac{a_3 t_3^2}{2}. \quad (7)$$

К записанным соотношениям, полученным на основе вышеприведенных законов классической механики, добавим еще два соотношения, выражающих основные условия для выполнения рабочей функции привода, обеспечивающего перемещение заслонки:

$$s_1 + s_2 + s_3 = s; t_1 + t_2 + t_3 = t. \quad (8)$$

В итоге получится система из семи алгебраических уравнений с семью неизвестными величинами:  $t_1, t_2, t_3, s_1, s_2, s_3, v_m$ .

Для решения этой системы получим одно алгебраическое уравнение 2-го порядка относительно величины скорости  $v_m$ :

$$v_m^2 \left( \frac{1}{2a_1} + \frac{1}{2a_3} \right) - v_m t + s = 0. \quad (9)$$

После решения этого квадратного уравнения и получения двух действительных корней выбирается в качестве решения корень, в большей степени подходящий по условиям поставленной задачи.

После нахождения максимальной скорости перемещения заслонки трубопровода  $v_m$  остальные неизвестные находятся по формулам

$$t_1 = v_m / a_1; t_3 = v_m / a_3; t_2 = t - t_1 - t_3; s_1 = v_m^2 / 2a_1; s_2 = v_m t_2; s_3 = v_m^2 / 2a_3. \quad (10)$$

На основе полученных формул можно проанализировать влияние на указанные величины значений приложенной к заслонке массой  $m$  внешней силы  $F$  и сил торможения  $F_t$ . Изменение этих величин в процессе перемещения с заданными параметрами управления  $t_1, t_2, t_3$  может привести либо к неполному закрытию трубопровода, либо к удару заслонки по трубе со скоростью  $v_k$ , которую заслонка может иметь после перемещения на расстояние  $s$ .

В качестве еще одного результата проведенного анализа следует отметить, что величина внешней силы  $F$  на участке разгона  $s_1$  должна быть не только больше силы торможения  $F_t$ , но и превышать некоторое значение  $F_{\min}$ , при котором длина участка  $s_2 = 0$ . Иначе не получается решения задачи при заданных значениях параметров  $s, t$ .

Следующий вариант алгоритма перемещения заслонки представляет случай, когда действующие на тело силы являются *переменными по величине*.

С такой ситуацией можно столкнуться, предполагая, что сила трения, препятствующая перемещению тела по поверхности, каким-то образом зависит от скорости его движения. В рассмотренном алгоритме этот случай моделировался представлением движения заслонки на участках  $s_1, s_3$  с переменными по времени перемещения ускорениями  $a_1, a_3$ .

Для такого случая изменится ряд формул (10) для величин  $t_1, t_3, s_1, s_3$ , которые можно представить в виде

$$t_1 = A_{11} v_m; t_3 = A_{31} v_m; s_1 = A_{12} v_m^2; s_3 = A_{32} v_m^2, \quad (11)$$

где

$$A_{11} = \frac{n_1}{\sum_{i=1}^{n_1} a_i^1}; A_{12} = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} a_i^1 (2i-1)}{2 \left( \sum_{i=1}^{n_1} a_i^1 \right)^2}; A_{31} = \frac{n_3}{\sum_{i=1}^{n_3} a_i^3}; A_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{n_3} a_i^3 (2i-1)}{2 \left( \sum_{i=1}^{n_3} a_i^3 \right)^2}, \quad (12)$$

$a_i^1, a_i^3$  – ускорения, определяемые переменными силами на 1-м и 3-м участках движения тела соответственно.

С учетом введенных обозначений уравнение (9) преобразуется к виду

$$v_m^2 (A_{11} + A_{31} - A_{12} - A_{32}) - v_m t + s = 0. \quad (13)$$

Дальнейшая процедура решения уравнения (14) и анализа полученных результатов аналогична той, которая показана выше.

С учетом введенных понятий технической диагностики в качестве диагностических признаков данного объекта можно считать его координату  $s(t)$  и скорость  $v(t)$  в фиксированный момент времени  $t = t_1 + t_2 + t_3$ . Объект можно считать работоспособным, если в этот момент времени координата

его нахождения будет равна заданному расстоянию  $s$ , а скорость будет равна 0. Однако на эти идеальные условия должны быть наложены некоторые допуски с принятием соответствующих мер для выполнения условий штатной работы объекта и обеспечения безопасности.

В качестве диагностических характеристик могут быть также рассмотрены зависимости скорости перемещения тела или проходимого им пути от времени. В этом случае рассматриваются динамические диагностические характеристики, которые по критериям работоспособности [1] должны сравниваться с реперными зависимостями. Необходимо также отметить, что при этом происходит совмещение диагностической характеристики объекта с его рабочей функцией. Этот частный случай обусловлен тем, что объект представлен по законам классической механики в виде материальной точки, для которой не рассматривается изменение свойств структуры под воздействием внешних факторов и режимов работы, указанных выше.

Представленный алгоритм был реализован в расчетной программе, созданной в программном пакете «Matlab». Проводимые по этой программе расчетные исследования для перемещаемого объекта с конкретными параметрами позволяют определить оптимальные режимы перемещения заслонки трубопровода за счет варьирования величины и временной зависимости приложенной к объекту внешней силы  $F(t)$ . При этом может быть определен режим с минимальным расходом энергии на перемещение тела и безопасным его приближением к конечной точке пути.

### Заключение

В статье рассмотрены вопросы, которые возникают на этапе проектирования систем диагностирования новых технических объектов. К их числу, несомненно, относится и разработка алгоритмов диагностирования. Для решения задачи продления ресурса и обеспечения надежного функционирования в процессе эксплуатации в этих алгоритмах должна быть представлена связь между основными рабочими функциями объекта и теми структурными параметрами, которые в наибольшей степени влияют на выполнение этих функций. Иначе говоря, должен быть определен список диагностических признаков объекта, определяющих его техническое состояние и не зависящих от режима функционирования. В данной статье структура технического объекта не представлена, поскольку контролируемый объект сведен к принятому в механике понятию материальной точки. В то же время такое упрощение материального тела позволяет на основе известных законов механики расширить список параметров объекта, связанных с оценкой его технического состояния и выполнением функций работоспособности. Такой подход иллюстрируется представленным в работе алгоритмом перемещения заслонки трубопровода АЭС, который позволяет оптимизировать этот процесс и понять причины возможных дефектов. Ряд имеющихся на АЭС методик диагностирования электропривода ориентируется на оценку крутящего момента, создаваемого электродвигателем и параметрами его работы. Поэтому картина перемещения самой заслонки как механической части такой системы утрачивается, что не способствует пониманию причин возможных неисправностей при реализации основной рабочей функции: перекрыть движение теплоносителя за заданное время. При этом необходимо обеспечение работоспособности на заданное количество циклов. Для решения задач технической диагностики указанного объекта была создана расчетная программа.

В то же время на основе материалов, изложенных в работе, может быть сделан ряд основополагающих выводов для технической диагностики как науки:

1. Корректировка и уточнение некоторых общеизвестных физических понятий (работа, энергия и т.д.) с привязкой их к понятию технического состояния позволят понять процесс возникновения неработоспособности и устранить некоторые причины ее возникновения при проведении диагностических измерений на этапе эксплуатации объекта.

2. Использование понятия *полной энергии объекта* или *системы тел* позволит расширить список и номенклатуру параметров и характеристик, определяющих техническое состояние, и расширить список диагностируемых объектов, *рабочие функции* которых реализуются на основе других физических законов.

### Список литературы

1. 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.
2. Панкин А. М. Методология создания систем диагностирования в атомной энергетике // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 1. С. 133–138.

3. Kalyutik A., Kiselev V., Rouzich E. Impact of the Underground Metal Construction Cover Layer on the Cathode Protection Efficiency // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018.
4. Kiselev V., Kalyutik A., Rouzich E. Influence of the soil electrical conductivity in the area of the underground pipeline on energy efficiency of the cathodic protection // MATEC Web of Conferences. 2018.
5. Панкин А. М. Об основных понятиях технической диагностики // Контроль. Диагностика. 2010. № 10. С. 38–45.
6. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика : учеб. пособие. М. : Наука, 1966. 404 с.

### References

1. 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.)
2. Pankin A.M. Methodology for creating diagnostic systems in the nuclear power industry. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii = Problems of mechanical engineering and automation.* 2019;(1):133–138. (In Russ.)
3. Kalyutik A., Kiselev V., Rouzich E. Impact of the Underground Metal Construction Cover Layer on the Cathode Protection Efficiency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2018.
4. Kiselev V., Kalyutik A., Rouzich E. Influence of the soil electrical conductivity in the area of the underground pipeline on energy efficiency of the cathodic protection. *MATEC Web of Conferences.* 2018.
5. Pankin A.M. About the basic concepts of technical diagnostics. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics.* 2010;(10):38–45. (In Russ.)
6. Savel'ev I.V. *Kurs obshchey fiziki. T. 1. Mekhanika, kolebaniya i volny, molekulyarnaya fiziki: ucheb. posobie = General Physics course. Vol. 1. Mechanics, vibrations and waves, molecular physics : textbook.* Moscow: Nauka, 1966:404. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

#### Александр Михайлович Панкин

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

#### Александр Антонович Калюттик

кандидат технических наук,  
директор Высшей школы атомной  
и тепловой энергетики,  
Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого  
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)  
E-mail: Kalyutik@yandex.ru

#### Дмитрий Владимирович Лялюев

начальник отдела,  
Научно-исследовательский технологический институт  
имени А. П. Александрова,  
(Россия, Ленинградская обл., г. Сосновый Бор,  
Капорское шоссе, 72)  
E-mail: ldv@niti.ru

#### Alexander M. Pankin

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

#### Aleksandr A. Kalyutik

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

#### Dmitriy V. Lyalyuev

Department head,  
A. P. Alexandrov Research Institute of Technology  
(72 Kaporskoe highway, Sosnovy Bor,  
Leningrad region, Russia)

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

**Поступила в редакцию / Received 15.11.2021**

**Поступила после рецензирования / Revised 20.11.2021**

**Принята к публикации / Accepted 25.11.2021**