

РАЗРАБОТКА ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ ВРЕМЕННОГО ДРЕЙФА ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

Л. О. Савин^а, сотрудник

М. В. Королев^а, канд. техн. наук, доцент

М. В. Носов^а, канд. техн. наук

^аАкадемия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, РФ

Постановка проблемы: воздействие внешних факторов окружающей среды отрицательно сказывается на процессах эксплуатации автомобильной техники. Несвоевременное прогнозирование и диагностика существенно снижают надежность как отдельных узлов, так и в целом автомобиля, что в свою очередь ограничивает ресурс его работы. **Цель:** анализ, в зависимости от математического аппарата, методов прогнозирования, определяющих параметры состояния транспортного средства, и разработка прогнозных моделей временного дрейфа этих параметров при эксплуатации автомобильной техники в различных условиях. **Результаты:** разработаны прогнозные модели дрейфа параметров автотранспорта при его эксплуатации в особых условиях. Под особыми условиями эксплуатации понимаются такие, когда происходит сочетание нескольких неблагоприятных природно-климатических факторов: температуры окружающей среды, запыленности воздуха и т. д. Новизна подхода состоит в том, что выбор вида функции, описывающей изменение контролируемых параметров узлов и агрегатов транспорта во времени, должен производиться с учетом описанных в начале работы дестабилизирующих факторов, влияющих на его техническое состояние. **Практическая значимость:** использование прогнозных моделей в работе позволит рассчитать момент достижения определяющими параметрами автомобилей своих предельно допустимых значений. Сформулированные аналитические выражения могут быть использованы для нахождения вероятности безотказной работы узлов и агрегатов автомобильной техники на заданном интервале времени. В дальнейшем на основе данных зависимостей могут быть сформированы показатели эффективности функционирования автотранспорта, зависящие от периодичности проведения, и рассчитаны оптимальные значения периодичности, при которых введенные показатели будут достигать своих экстремальных значений.

Ключевые слова — особые условия, автомобильная техника, дрейф параметров, модели прогнозирования, эксплуатация автомобилей, вероятностные показатели.

Введение

В настоящее время роль и значение автомобильного транспорта постоянно возрастают. Очевидно, что при этом все более и более важную роль начинают играть вопросы повышения надежности автомобильной техники (АТ) и обеспечения ее работоспособности на заданном интервале времени (сроке службы). Существенность этих вопросов возрастает при эксплуатации АТ в так называемых особых условиях: экстремальных температур (на Крайнем Севере, в Заполярье или в пустынных районах), повышенной влажности, сложного рельефа местности (например, в горах), бездорожья и т. д. При этом перечисленные экстремальные условия эксплуатации АТ, как правило, характеризуются одновременным сочетанием нескольких неблагоприятных факторов, каждый из которых оказывает влияние на техническое состояние как АТ в целом, так и ее отдельных узлов. Воздействие дестабилизирующих факторов приводит к постепенному изменению контролируемых параметров АТ, а выход этих параметров за допустимые пределы, как правило, приводит к отказу.

Влияние особых условий эксплуатации на техническое состояние АТ

Основными процессами, вызывающими изменение технического состояния деталей и АТ в целом, являются различные виды изнашивания [1]: абразивное, характерное для трущихся деталей: тормозных накладок колодок или открытых узлов трения типа шкворневых соединений и рессорных шарниров; эрозионное, которому подвержены, например, рабочие поверхности тарелок выпускных клапанов двигателя и жиклеры карбюратора; окислительное, наблюдаемое на деталях цилиндропоршневой группы, гидроусилителей, тормозной системы с гидроприводом; усталостное и коррозионное изнашивание, а также пластическая деформация, коррозия, усталостное разрушение и иные физико-химические изменения материала (старение) различных деталей. Скорость протекания таких процессов существенно зависит от условий эксплуатации АТ. Так, например, интенсивность изнашивания агрегатов АТ в зависимости от температуры воздуха изменяется по параболической кривой и имеет минимум, соответствующий оптимальной температуре, при этом очевидно, что для каждого

агрегата существует наиболее подходящий тепловой режим. Так, по данным эксплуатации АТ в условиях жаркого сухого климата были определены 154 детали 18 наименований, параметры которых лимитируют надежность двигателя КамАЗ [1]. При этом в жарких и сухих условиях эксплуатации на долю двигателя приходится 30–40 % всех отказов АТ, трудоемкость устранения которых составляет до 50 % трудоемкости ремонта. Из-за быстрого испарения тормозной жидкости образуются паровые пробки в пневмогидравлическом и гидравлическом тормозных приводах, что повышает риск возникновения в них отказов. Увеличение пенообразования жидкостей в гидроусилителе рулевого привода влечет за собой уменьшение рабочего давления, которое сказывается на работоспособности гидроусилителя, и т. д.

По этим же данным сильная запыленность воздуха является основной причиной абразивного износа узлов и агрегатов АТ. При работе автомобилей ЗИЛ в карьерах с повышенной запыленностью интенсивность изнашивания цилиндропоршневой группы двигателей может достичь катастрофических величин уже через несколько тысяч километров пробега. Эффективность работы системы охлаждения АТ при запыленности воздуха также снижается, в ней образуется накипь, при этом происходит быстрое старение масла из-за окислительного процесса, способствующего отложению механических примесей и смолистых веществ на поверхности многих деталей, и т. д. При низких температурах (на Крайнем Севере) износ холодных двигателей при их пуске составляет до 70 % от общих эксплуатационных износов. Недостаточная морозостойкость используемых материалов приводит к более частым поломкам узлов и агрегатов АТ, фактический срок службы которой в районах с холодным климатом в 1,5–2 раза ниже нормативного. Установлена также и существенная температурная зависимость показателей надежности [2]: поток отказов деталей и узлов АТ в зимнее время возрастает в 1,5–2,5 раза по сравнению с летним; наработка на отказ и коэффициент готовности из-за хрупких поломок деталей уменьшаются в три и более раза, и пр. В горных условиях эксплуатации увеличиваются нагрузки на детали и элементы рулевого управления, снижается эффективность работы тормозной системы АТ с пневмогидравлическим и пневматическим приводами, из-за частых торможений на спусках интенсивно изнашиваются тормозные диски, у коробок передач и агрегатов силовой передачи происходит повышенный износ элементов главного фрикциона. Ряд прибрежных морских районов характеризуется повышенной коррозионной активностью воздуха, и свойственная таким районам агрессивность окружающей среды также

вызывает интенсивную коррозию деталей, сокращая ресурс автомобиля примерно на 10 %.

Помимо природно-климатических условий, на техническое состояние АТ влияют дорожные условия, а также условия движения. Так, для сцепления и рулевого управления наиболее легкими являются условия эксплуатации при движении по дорогам с асфальтобетонным покрытием, а наиболее тяжелыми — по улицам городов. Для тормозной системы наиболее легкие условия эксплуатации — при движении по грунтовым дорогам в равнинных местностях и наиболее тяжелые — при движении в карьерах, и т. д. В среднем износ и разрушение дорожного покрытия сокращают надежность АТ на 14–33 %.

Совокупное влияние возможных сочетаний названных выше условий учитывается специальными поправочными коэффициентами. Так, для жаркого и холодного климата для периодичности технического обслуживания (ТО) используется коэффициент 0,9; для оценки трудоемкости работ по ТО — от 1,1 до 1,3; до капитального ремонта коэффициент предусматривает 0,7–0,9 установленного пробега и т. д.

Современный автомобиль состоит из 15–18 тысяч деталей, из которых около 9 тысяч теряют свои первоначальные свойства при работе, причем около 3–4 тысяч деталей имеют срок службы меньше, чем сама АТ, и являются объектом особого внимания при эксплуатации, особенно в экстремальных условиях [2]. Проведенный анализ имеющихся работ по данной тематике позволил выделить из общей совокупности технических параметров АТ ряд наиболее важных, которые вплотную связаны с ускоренным выходом из строя узлов АТ в особых условиях его эксплуатации. Такие параметры будем в дальнейшем называть определяющими, при этом очевидно, что для конкретных условий эксплуатации АТ эти параметры могут быть различными. Таким образом, под определяющим параметром АТ будем понимать такой информативный (контролируемый) параметр, который в данный момент времени оказывает наибольшее влияние (имеет решающее значение) для обеспечения работоспособности АТ и при выходе которого за допустимые пределы происходит отказ АТ. Следовательно, поддержание значений указанных параметров в пределах нормы позволит обеспечить работоспособность АТ в течение заданного интервала времени (срока службы).

Обзор существующих методов прогнозирования случайных процессов и возможность их использования для оценки надежности АТ

Зная закономерности постепенного изменения значений определяющих параметров АТ с течением времени (их временного дрейфа) и предвидя

момент выхода этих параметров за установленные пределы, можно произвести их заблаговременную и своевременную настройку (регулировку) и тем самым не допустить отказа АТ. Задача по установлению момента достижения определяющим параметром своего предельно допустимого значения решается путем прогнозирования, по результатам которого делают научно обоснованные выводы о потенциальной надежности того или иного узла (агрегата) АТ, т. е. о возможности его использования по назначению в течение интервала времени до момента очередного контроля. Классификация существующих методов прогнозирования в зависимости от применяемого математического аппарата довольно обширна и включает свыше двухсот методов [3]. На практике наиболее широко применяются так называемые статистические методы, направленные на обработку количественной информации об объекте прогнозирования по принципу выявления содержащихся в ней закономерностей развития и математических взаимосвязей характеристик с целью получить прогнозные модели. В свою очередь, статистические методы прогнозирования включают методы экстраполяции и методы статистической классификации [3]. В зависимости от используемого математического аппарата различают два вида прогнозирования экстраполяцией: аналитическое прогнозирование, основанное на применении экстраполяционных полиномов (например, Лагранжа) или уравнений регрессии, и вероятностное прогнозирование, основанное на теории вероятностей. Целью аналитического прогнозирования является определение времени безотказной работы обслуживаемого объекта. Исследование присущих АТ закономерностей должно быть основано на использовании вероятностно-статистических методов прогнозирования, позволяющих получить плотность распределения времени до выхода параметра за допустимые пределы, а также вероятность безотказной работы на заданном интервале времени [4]. Однако невозможность учесть все внешние и внутренние воздействующие факторы приводит к некоторой неопределенности состояния анализируемых параметров АТ. В этих условиях применение к анализу параметров АТ чисто детерминированных подходов не всегда оправдывает себя [5].

Рассмотрим существующие модели случайных процессов (СП) и возможность их применения для прогнозирования экстраполяцией дрейфа контролируемых параметров АТ. Так, известно несколько способов задания случайных функций времени, из которых наиболее полным является определение случайного процесса с позиций аксиоматического подхода к теории вероятностей, предложенное А. Н. Колмогоровым [6]. При таком представлении СП исходят из того, что его исчерпывающей характеристикой является

многомерный закон распределения. Полное описание случайного процесса дается совместным распределением бесчисленного множества его сечений, взятых в любые моменты времени. Таким образом, как и любой СП, временной дрейф контролируемых параметров АТ может быть описан многомерной плотностью распределения. Однако теория СП в общем виде отличается значительной сложностью математического аппарата и поэтому мало пригодна для решения инженерных задач [4]. Следовательно, важное значение приобретает выявление моделей СП, которые должны отражать существенные свойства реальных процессов и в то же время быть простыми и удобными для расчета основных характеристик. Одни из разновидностей таких моделей — так называемые квазидетерминированные (КД) модели, которые подробно описаны ниже.

Таким образом, большая часть известных теоретических методов прогнозирования надежности имеет ряд недостатков и ограничений, существенно затрудняющих возможности их применения на практике. Не являются исключением и известные работы по прогнозированию надежности АТ [2, 7–13]. Поскольку все они, как правило, не ставят своей целью разработку новых методов прогнозирования, а используют уже существующие, то имеют все те же, присущие общим методам прогнозирования, недостатки. К таким недостаткам, как уже отмечалось, относится невозможность учета воздействия на АТ всей совокупности воздействующих на нее факторов, приводящая к неопределенности состояния анализируемых параметров АТ и затрудняющая применение к их анализу известных методов аналитического прогнозирования, в том числе с использованием уравнений регрессии, а также методов факторного анализа. Кроме того, указанные методы отличаются значительной сложностью математического аппарата и поэтому также мало пригодны для решения прикладных задач. Использование же на практике многомерных плотностей распределения СП приводит к значительным математическим трудностям не только при решении задач прогнозирования, но и при расчетах вероятностных характеристик и изучении закономерностей изменения параметров АТ во времени. Это в полной мере относится, например, к работам П. П. Ощепкова [2] и А. Н. Макаровой [7], использовавших для прогнозирования надежности методы регрессионного анализа; В. Л. Литвиненко и М. А. Саблиной, описывающих возможность аналитического прогнозирования надежности [8], к публикациям В. В. Ионина, основанным на использовании вероятностно-статистического прогнозирования, а также прогнозирования при помощи статистической классификации [9], работам Л. В. Ефремова, посвященным использованию ме-

тодов факторного анализа [10], и других авторов [11–13]. Имеющиеся ограничения всех указанных способов значительно затрудняют их использование при практической эксплуатации АТ и делают нерациональным их выбор для прогнозирования экстраполяцией временного дрейфа контролируемых параметров АТ. Вместе с тем принципиально новые возможности вероятностного описания СП для изучения закономерностей изменения выходных параметров АТ во времени в целях решения задач прогнозирования появляются при использовании КД-моделей СП, под которыми понимаются неслучайные функции времени, зависящие от нескольких случайных аргументов (случайных величин).

Прогнозирование надежности АТ при помощи КД-моделей временного дрейфа ее определяющих параметров

Анализ воздействий описанных выше дестабилизирующих факторов позволяет сделать вывод, что изменению во времени контролируемых параметров АТ присуща характерная особенность, проявляющаяся в том, что их случайному изменению свойственно медленное либо неубывание, либо невозрастание его значения, сопровождающееся незначительными отклонениями от монотонности. При этом постепенное изменение этих значений не исключает кратковременных, сравнительно небольших его возрастных. Таким образом, значение контролируемых параметров АТ флуктуирует вокруг некоторой монотонно изменяющейся функции. Эта особенность позволяет представить процесс изменения данных параметров в виде суммы двух его составляющих — монотонной и флуктуационной [4], т. е.

$$y(t) = y_{\text{КД}}(t) + \psi(y, t), \quad (1)$$

где $y_{\text{КД}}(t)$ — КД-функция времени, описывающая протекание необратимых физических процессов; $\psi(y, t)$ — стационарный случайный процесс, описывающий действие обратимых флуктуаций внутренних и внешних условий.

Таким образом, при слабых флуктуациях монотонность СП позволяет для описания процесса дрейфа параметров использовать квазислучайный (квазидетерминированный) процесс, представляющий собой совокупность детерминированной функции, отражающей закономерность дрейфа параметров.

В качестве базовых функций для КД-моделей могут использоваться различные детерминированные функции. При этом выделяют две разновидности моделей дрейфа параметра: достаточно общие (универсальные) модели, отражающие в широких пределах различный характер изме-

нения параметра, и элементарные модели, имитирующие, как правило, конкретную закономерность дрейфа [3].

К универсальным следует отнести модель следующего вида:

$$\Pi(t) = \sum_{l=1}^{\mu} A_l F_l(\xi, t), \quad (2)$$

где $\Pi(t)$ — контролируемый параметр АТ; $F_l(\xi, t)$ — базисное выражение, составляющее основу многочлена; A_l — степенные адаптационные коэффициенты; $l = 1, 2, \dots, \mu$ — степень базисных выражений.

Выражение вида (2) достаточно точно описывает монотонные процессы и представляет собой сумму полиномов различных степеней от 1 до μ , вклад которых в изменения функций различен и характеризуется зависимостью $A = f(l)$, $l = 1, 2, \dots, \mu$.

В ряде случаев при решении задачи прогнозирования может использоваться обобщенная математическая модель дрейфа выходного параметра, представленная в виде дифференциального уравнения [3]

$$d\Pi(t) / dt = -kF(\Pi), \quad (3)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от скорости дрейфа; $F(\Pi)$ — функция, определяемая принятой гипотезой о характере дрейфа.

Очевидным достоинством моделей вида (2), (3) является их универсальность. Вместе с тем анализ закономерностей изменения контролируемых параметров АТ показывает возможность их аппроксимации значительно более простыми аналитическими выражениями — различными степенными, показательными, логарифмическими и другими функциями. При этом наиболее подходящими являются следующие виды моделей.

— Линейная модель дрейфа

$$\Pi(t) = \Pi_0 - a_1 t. \quad (4)$$

Линейные модели достаточно хорошо описывают процесс простого накопления необратимых изменений, характерных, например, для постепенного износа деталей АТ под воздействием сил трения, зависящего от материала и качества обработки поверхностей, смазки, нагрузки, теплового режима и пр. [9].

— Экспоненциальная модель

$$\Pi(t) = \Pi_0 e^{\frac{-vt}{T_0}}. \quad (5)$$

Экспоненциальные модели используются для описания процессов старения материалов, они

наиболее адекватны реальным физическим процессам, происходящим, например, при так называемых усталостных разрушениях деталей АТ.

— Логарифмическая модель

$$\Pi(t) = \Pi_0 - \Pi_0 \ln \left(1 + \frac{vt}{\Pi_0} \right). \quad (6)$$

Логарифмические модели могут применяться для описания процесса старения материалов, у которых скорость старения убывает обратно пропорционально накопившимся в этих материалах изменениям.

— Нелинейная (параболическая) модель

$$\Pi(t) = a_0 - a_1 t + a_2 t^2 \quad (7)$$

или

$$\Pi(t) = a_0 + a_1 t - a_2 t^2. \quad (8)$$

Параболические модели используются, если кроме простого накопления необратимых изменений имеются какие-либо ускоряющие или замедляющие факторы, например воздействие высокой влажности или температуры.

Кроме рассмотренных моделей, для описания дрейфа определяющих параметров АТ могут использоваться и иные, более сложные модели, например кубическая зависимость и др. При этом каждая из функций вида (4)–(8) может описывать закономерность временного дрейфа контролируемых параметров АТ и имеет случайные коэффициенты Π_0 , a_1 (и a_2), распределенные по одному из известных законов. Задача прогнозирования технического состояния АТ сводится к определению плотности распределения времени (ПРВ) до выхода параметра за установленные нормативными документами пределы, т. е. к нахождению плотности распределения функции по заданному распределению ее аргументов. Найденная плотность распределения будет являться исчерпывающей (универсальной) характеристикой непрерывной случайной величины, полностью характеризующей ее с вероятностной точки зрения.

Разработка и исследование моделей дрейфа

Линейная модель дрейфа

Выразив t из выражения (4), описывающего линейную модель дрейфа контролируемого параметра АТ, можно записать

$$t = \frac{\Pi_0 - \Pi(t)}{a_1}. \quad (9)$$

С учетом того, что контролируемые параметры АТ со временем изменяются, достигая своего предельно допустимого значения $\Pi_{пр}$ в момент

времени $\tau_{пр}$, т. е. $\Pi(\tau_{пр}) = \Pi_{пр}$, выражение (9) можно записать в виде

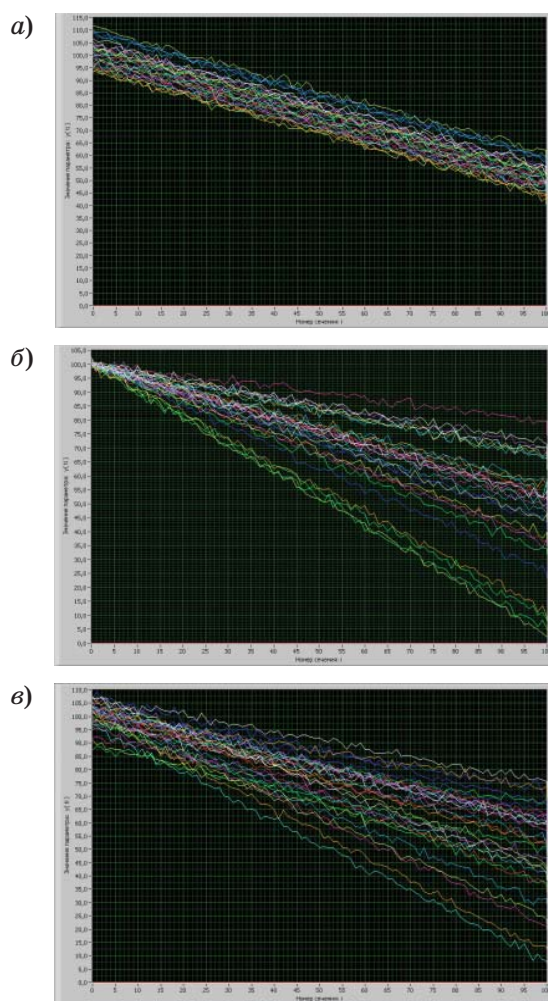
$$\tau_{пр} = \frac{\Delta\Pi}{a_1}, \quad (10)$$

где

$$\Delta\Pi = \Pi_0 - \Pi_{пр}. \quad (11)$$

Введение граничного (предельно допустимого) значения параметра $\Pi_{пр}$ и связанного с ним случайного времени достижения случайным процессом дрейфа параметра этого предельного значения $\tau_{пр}$ позволяет перейти к вероятностному описанию свойств АТ при ее длительном функционировании в простой и наглядной форме в виде одномерной функции распределения вместо многомерной.

Так, при линейной модели дрейфа параметра возможны три случая (рисунок, а–в).



■ Примеры линейных зависимостей временного дрейфа контролируемых параметров АТ для различных случайных коэффициентов: а — $\Delta\Pi$; б — a_1 ; в — a_1 и $\Delta\Pi$

В первом случае дрейф контролируемого параметра происходит монотонно для всей выборки АТ, что соответствует ситуации, когда все они эксплуатируются в одинаковых условиях; во втором случае скорость дрейфа параметра у различных экземпляров АТ различна, когда проведена начальная регулировка параметров АТ и условия ее эксплуатации различны; в третьем случае и начальное значение параметра, и скорость его дрейфа у всех выбранных экземпляров АТ различны.

Случай 1. В уравнении (10) a_1 — случайная величина, распределенная по заданному закону $\omega(a_1)$, $\Delta\Pi$ — постоянная величина (константа).

В соответствии с общим подходом к решению задачи выразим из (11) случайную величину a_1 , получив обратную функцию ψ_{a_1} :

$$a_1 = \psi_{a_1} = \frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}}. \quad (12)$$

Находя модуль ее производной, получаем якобиан J_{a_1} :

$$J_{a_1} = \frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}^2}. \quad (13)$$

В соответствии с (11) выражение для плотности распределения времени достижения параметром своего предельного значения имеет вид

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \omega(\psi_{a_1}) J_{a_1}, \quad (14)$$

где $\omega(\psi_{a_1})$ — плотность распределения обратной функции (12).

Подставив в формулу (14) выражения (13) и (12), запишем выражение для ПРВ достижения параметром предельно допустимого значения

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}^2} \omega\left(\frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}}\right). \quad (15)$$

Случай 2. Пусть теперь в выражении (10) $\Delta\Pi$ — случайная величина, распределенная по заданному закону $\omega(\Delta\Pi)$, a_1 — постоянная величина. Для данного случая по аналогии с предыдущим в качестве обратной функции выберем случайную величину $\Delta\Pi$, выразив ее из формулы (10):

$$\Delta\Pi = \psi_{\Delta\Pi} = a_1 \tau_{\text{пр}}. \quad (16)$$

Найдя модуль производной этого выражения, получим якобиан $J_{\Delta\Pi}$:

$$J_{\Delta\Pi} = a_1. \quad (17)$$

Используя зависимости (14), (16), (17), запишем итоговое выражение для ПРВ достижения параметром предельного значения

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = J_{\Delta\Pi} \omega(\psi_{\Delta\Pi}) = a_1 \omega(a_1 \tau_{\text{пр}}). \quad (18)$$

Случай 3. Коэффициенты уравнения (10) $\Delta\Pi$ и a_1 — это случайные величины, которые имеют распределение $\omega_1(a_1)$ и $\omega_2(\Delta\Pi)$. Аналогично второму случаю в качестве обратной функции выберем случайную величину $\Delta\Pi$, имеющую вид (16). Дифференцируя обе части этого выражения, получим якобиан J , имеющий вид (17). В соответствии с общим подходом запишем выражение для ПРВ достижения параметром своего предельного значения с учетом выражений (16) и (17):

$$\begin{aligned} \omega(\tau_{\text{пр}}) &= \int_{-\infty}^{\infty} \omega_1(a_1) \omega_2(\psi_{\Delta\Pi}) J da_1 = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \omega_1(a_1) \omega_2(a_1 \tau_{\text{пр}}) a_1 da_1. \end{aligned} \quad (19)$$

Полученные зависимости совпали с выражениями, полученными графическим методом [6], что доказывает их справедливость.

От формул ПРВ достижения параметром своего предельного значения в общем виде (15), (18), (19) можно перейти к частному случаю, когда коэффициенты $\Delta\Pi$ и a_1 имеют не произвольный, а нормальный закон распределения случайных коэффициентов $\Delta\Pi$ и a_1 . Тогда эти уравнения можно записать в следующем виде:

— когда случайным является один из коэффициентов a_1 и $\Delta\Pi$ соответственно:

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{a_1}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}} - M_{a_1}\right)^2}{2\sigma_{a_1}^2}\right]; \quad (20)$$

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = a_1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta\Pi}} \exp\left[-\frac{(a_1 \tau_{\text{пр}} - M_{\Delta\Pi})^2}{2\sigma_{\Delta\Pi}^2}\right]; \quad (21)$$

— когда случайными являются оба коэффициента a_1 и $\Delta\Pi$:

$$\begin{aligned} \omega(\tau_{\text{пр}}) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi\sigma_{a_1}\sigma_{\Delta\Pi}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}} - M_{a_1}\right)^2}{2\sigma_{a_1}^2}\right] \times \\ &\times \exp\left[-\frac{(\Delta\Pi - M_{\Delta\Pi})^2}{2\sigma_{\Delta\Pi}^2}\right] \frac{\Delta\Pi}{\tau_{\text{пр}}^2} d\Delta\Pi. \end{aligned} \quad (22)$$

Для нахождения вероятности невыхода параметром $\Pi(t)$ за пределы $\Pi_{\text{пр}}$ в течение заданного времени t_3 необходимо подставить выражения (20)–(22) в формулу

$$P(\Pi(t) \geq \Pi_{\text{пр}} \forall t \leq t_3) = 1 - \int_0^{t_3} \omega(\tau_{\text{пр}}) d\tau_{\text{пр}}.$$

Логарифмическая модель дрейфа

Для логарифмической модели дрейфа контролируемых параметров АТ вида (5) процесс нахождения ПРВ достижения параметром своего предельного значения $\omega(\tau_{\text{пр}})$ может быть рассмотрен для двух возможных случаев: 1) v — случайная величина, распределенная по заданному закону $\omega(v)$, Π_0 — постоянная величина (константа); 2) Π_0 и v — случайные величины, также распределенные по заданным законам $\omega_1(\Pi_0)$ и $\omega_2(v)$ соответственно. Для каждого из них согласно описанному выше подходу можно получить аналитические выражения для ПРВ до достижения параметром предельного значения, соответственно:

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \omega(\psi_v) J_v = \omega(\psi_v) \frac{\Pi_0}{\tau_{\text{пр}}^2} \left(1 - \exp \frac{\Delta \Pi}{\Pi_0} \right);$$

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_2(\psi_v) \omega_1(\Pi_0) \frac{\Pi_0}{\tau_{\text{пр}}^2} \left(1 - \exp \frac{\Delta \Pi}{\Pi_0} \right) d\Pi_0.$$

Экспоненциальная модель дрейфа

Для экспоненциальной модели дрейфа контролируемых параметров АТ вида (4) процесс нахождения ПРВ достижения параметром своего предельного значения $\omega(\tau_{\text{пр}})$ так же, как и для логарифмической модели, может быть рассмотрен для двух аналогичных случаев. При этом в соответствии с описанным выше подходом выражения для ПРВ достижения параметром предельного значения будут иметь вид

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \omega(\psi_v) J_v = \omega(\psi_v) \frac{\Pi_0}{\tau_{\text{пр}}^2} \ln \left(\frac{\Pi_0}{\Pi_{\text{пр}}} \right);$$

$$\omega(\tau_{\text{пр}}) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega(\psi_v) \frac{\Pi_0}{\tau_{\text{пр}}^2} \ln \frac{\Pi_0}{\Pi_{\text{пр}}} \omega(\Pi_0) d\Pi_0.$$

Выбор вида функции, описывающей изменение контролируемых параметров АТ во времени, должен производиться с учетом описанных в начале работы дестабилизирующих факторов, влияющих на техническое состояние АТ при особых условиях ее эксплуатации.

Заключение

Таким образом, с использованием КД-моделей в работе были получены аналитические выражения для ПРВ достижения определяющим параметром АТ своего предельно допустимого значения. Данные выражения могут быть использованы для нахождения вероятности безотказной работы узлов и агрегатов АТ на заданном интервале времени. В дальнейшем на основе данных зависимостей могут быть сформированы показатели эффективности функционирования АТ, на которые влияет периодичность проведения ТО, и рассчитаны оптимальные значения периодичности ТО АТ, при которых введенные показатели будут достигать своих экстремальных значений.

Предложенный в статье подход, в отличие от известных методов прогнозирования (например, [7]), не требует доведения значений контролируемых параметров до предельно допустимого значения, т. е. достижения состояния отказа. Напротив, предложенные авторами прогнозные модели временного дрейфа параметров АТ как раз и направлены именно на предотвращение ее отказов, т. е. по своему содержанию носят предупредительный характер. Очевидно, что для разработки прогнозных моделей требуется набор и обобщение статистических данных, но не по числу отказов автомобильной техники, а по значениям контролируемых параметров в различные моменты времени. В качестве таких статистических данных могут быть использованы, например, результаты измерений параметров, проведенных при предыдущих сеансах ТО, и на практике задача по сбору и накоплению такой статистики не представляет значительных трудностей. В качестве необходимых действий для дальнейших исследований по данной тематике следует отметить и апробацию разработанных моделей на практике. Такая задача требует организации и проведения эксперимента по влиянию конкретных условий эксплуатации на определенные типы АТ, набора и анализа статистических данных, выбора соответствующей прогнозной модели временного дрейфа контролируемых параметров, а также проверки ее адекватности.

Литература

1. Лукинский В. С., Зайцев Е. И. Прогнозирование надежности автомобилей. — Л.: Политехника, 1991. — 224 с.
2. Ощепков П. П. Оценка влияния надежности автомобиля КамАЗ на безопасность дорожного движения в условиях Севера: дис. ... канд. техн. наук / ЯГУ им. М. М. Аммосова. — Якутск, 2000. — 147 с.
3. Калявин В. П. Основы теории надежности и диагностики. — СПб.: Элмор, 1998. — 172 с.
4. Вентцель Е. В., Овчаров Л. А. Задачи и упражнения по теории вероятностей. — М.: Высш. шк., 2000. — 366 с.
5. Ситчихина М. В. Разработка моделей и программных средств прогнозирования остаточного ресурса оборудования: дис. ... канд. техн. наук/ Байкальский университет экономики и права. — Иркутск, 2003. — 130 с.
6. Вентцель Е. В. Теория вероятностей. — М.: Высш. шк., 1999. — 576 с.
7. Макарова А. Н. Методика оперативного корректирования нормативов периодичности технического обслуживания с учетом фактических условий эксплуатации автомобилей: дис. ... канд. техн. наук / Тюменский государственный нефтегазовый университет. — Тюмень, 2015. — 216 с.
8. Литвиненко В. Л., Саблина М. А. Оценка и прогнозирование надежности транспортных средств // Вестник Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. Петра Василенко. 2014. № 151. С. 67.
9. Ионов В. В. Исследование эксплуатационной надежности агрегатов трансмиссии автомобилей КамАЗ // Вестник Северо-Восточного государственного университета. 2013. № 20. С. 82–87.
10. Ефремов Л. В. Проблемы управления надежностью ориентированной технической эксплуатацией машин. — СПб.: Art-Xpress, 2015. — 206 с.
11. Агеев Е. В., Щербаков А. В., Пикалов С. В. Особые условия технической эксплуатации и экологическая безопасность автомобилей: учеб. пособие. — Курск: Университетская книга, 2015. — 212 с.
12. Bayneva I. I., Baynev V. V. Study and Computer Modeling of Dependability of Technical Objects // Dependability. 2013. N 3. P. 38–54.
13. Trukhanov V. M. Ensuring the Reliability of Mechanical Systems by Means of Control Interventions // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2005. N 3. P. 85.

UDC 621.396

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.58

Predictive Models for Temporal Parameter Drift of Automotive Equipment during its Operation under Special Conditions

Savin L. O.^a, Employee, leonidys77@yandex.ruKorolev M. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, korol80@list.ruNosov M. V.^a, PhD, Tech., nosovm@mail.ru^aAcademy of the Federal Guard Service of the Russian Federation, 35, Priborostroitel'naya St., 302034, Orel, Russian Federation

Introduction: Impact of external environmental factors affects automotive engineering operations. Failures in forecasting and diagnostics significantly reduce the reliability of individual units and the vehicle as a whole, which in turn limits its operational life. Purpose: Depending on the mathematical tools, we analyze the forecasting methods which determine the vehicle condition parameters, and develop predictive models of temporal drift of these parameters for functioning under various conditions. **Results:** Predictive models have been developed for the parameter drift of a vehicle during its operation under special conditions. The special operation conditions are a combination of several adverse natural factors: temperature, dustiness of the air, etc. The novelty of our approach is that the functions describing the temporal changes of the controlled parameters of the vehicle units should be chosen with due regard to the above-mentioned destabilizing factors which influence the technical condition. **Practical relevance:** Predictive models allow you to calculate the moment when the critical parameters of a vehicle achieve their maximum permissible values. The obtained analytical expressions can be used to find the probability of failure-free operation of units and assemblies at a specified interval of time. In the future, these dependencies can be used to form vehicle operating efficiency indicators and calculate the optimal duration for technical inspection period during which these indicators will achieve their extreme values.

Keywords — Special Conditions, Automotive Engineering, Parameter Drift, Predictive Model, Operation of Vehicles, Probability Rates.

References

1. Lukinskii V. S., Zaitsev E. I. *Prognozirovanie nadezhnosti avtomobilei* [Forecasting the Reliability of Cars]. Leningrad, Politekhnik Publ., 1991. 224 p. (In Russian).
2. Oshhepkov P. P. *Otsenka vliianiia nadezhnosti avtomobilia KamAZ na bezopasnost' dorozhnogo dvizheniia v usloviakh Severa*. Dis. kand. tekh. nauk [Evaluation of the Impact of Reliability of the Kamaz Vehicle on Road Safety in the North]. PhD tech. sci. diss.]. Yakutsk, Iakutskii gosudarstvennyi universitet imeni M. M. Ammosov Publ., 2000. 147 p. (In Russian).
3. Kaliavin V. P. *Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostiki* [Fundamentals of the Theory of Reliability and Diagnostics]. Saint-Petersburg, Elmor Publ., 1998. 172 p. (In Russian).
4. Ventcel' E. V., Ovcharov L. A. *Zadachi i uprazhneniia po teorii veroiatnostei* [The Problems and Exercises in Probability

- Theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 366 p. (In Russian).
5. Sitchikhina M. V. *Razrabotka modelei i programnykh sredstv prognozirovaniia ostatochnogo resursa oborudovaniia*. Dis. kand. tekhn. nauk [Development of models and software for forecasting the residual life of equipment. PhD tech. sci. diss.]. Irkutsk, Baikal'skii gosudarstvennyi universitet ekonomiki i prava Publ., 2003. 130 p. (In Russian).
 6. Ventcel' E. V. *Teoriya veroyatnostej* [Theory of Probability]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1999. 576 p. (In Russian).
 7. Makarova A. N. *Metodika operativnogo korrektsionirovaniia normativov periodichnosti tekhnicheskogo obsluzhivaniia s uchetom fakticheskikh uslovii ekspluatatsii avtomobilei*. Dis. kand. tekhn. nauk [Technique of Operative Correction of Norms of Periodicity of Maintenance Service Taking into Account Actual Conditions of Exploitation of Cars. PhD tech. sci. diss.]. Tyumen, Tiimenskii gosudarstvennyi neftegazovyi universitet Publ., 2015. 216 p. (In Russian).
 8. Litvinenko V. L., Sablina M. A. Estimation and Prediction of Vehicle Reliability. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta sel'skogo khoziaistva imeni Petra Vasilenko*, 2014, no. 151, p. 67 (In Russian).
 9. Ionov V. V. Study of the Operational Reliability of KamAZ Vehicles Transmission Units. *Vestnik Severo-Vostochnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 20, pp. 82–87 (In Russian).
 10. Yefremov L. V. *Problemy upravleniia nadezhnostno-orientirovannoi tekhnicheskoi ekspluatatsiei mashin* [Problems of Reliability-Oriented Technical Operation of Machines]. Saint-Petersburg, Art-Xpress Publ., 2015. 206 p. (In Russian).
 11. Ageev E. V., Shherbakov A. V., Pikalov S. V. *Osobyie usloviia tekhnicheskoi ekspluatatsii i ekologicheskaiia bezopasnost' avtomobilei* [Special Conditions of Technical Operation and Environmental Safety of Cars]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2015. 212 p. (In Russian).
 12. Bayneva I. I., Baynev V. V. Study and Computer Modeling of Dependability of Technical Objects. *Dependability*, 2013, no. 3, pp. 38–54.
 13. Trukhanov V. M. Ensuring the Reliability of Mechanical Systems by Means of Control Interventions. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2005, no. 3, p. 85.

**Научный журнал
«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»
выходит каждые два месяца.**

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 4800 рублей, для подписчиков стран СНГ — 5400 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,

эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru,

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru,

сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«BTL» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья)

вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>;

РУКОНТ: <http://www.rucont.ru>; ИВИС: <http://www.ivis.ru/>

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2016 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/>

journal/n/informatsionno-upravlyayuschiesistemy).