



АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВТОМОБИЛЯ В ТЕЧЕНИЕ РЕЙСА

Н.Н. Бахтадзе, Л.Г. Дмитренко, А.В. Герасимов (ИПУ РАН)

Представлена бортовая автоматизированная система поддержки принятия решения водителем по выбору режима эксплуатации автомобиля, предназначенная для сохранения штатных параметров его функционирования. Показано, что данная система классифицируется как интеллектуальная, так как во время совершения рейса она принимает на себя некоторые аспекты интеллектуальной деятельности водителя. Предложенная автоматизированная система не является диагностической, потому что предназначена для предупреждения возможных неисправностей, но не для фактического их обнаружения.

Ключевые слова: бортовая интеллектуальная автоматизированная система, идентификация, прогнозирование, неисправности, автомобиль.

Как известно, основной задачей автотранспорта является осуществление перевозок грузов и пассажиров [1]. Эта задача успешно решается при соблюдении трех условий: а) маршрут рейса существует, б) водитель психологически мотивирован и физически в состоянии совершать рейс, в) автомобиль исправен на всем протяжении маршрута. Первые два условия организационные, поэтому принципиально достаточно, чтобы они были удовлетворены к началу рейса. Но третье условие должно выполняться в течение всего рейса, так как даже выход в рейс исправного автомобиля не гарантирует сохранения всех его функциональных качеств в дальнейшем. В соответствии с этим одна из проблем, решаемых водителем в процессе совершения рейса, является слежение за качеством работы всех узлов и агрегатов автомобиля — слежение за его техническим состоянием.

Так как практически все современные автомобили оснащены бортовыми маршрутными компьютерами, то решение проблемы мониторинга технического состояния автомобиля, в числе прочих задач автоматизации управления автомобилем, включено в программные комплексы этих компьютеров в виде диагностических подсистем. Некоторые модели бортовых компьютеров используют собственные программные диагностические средства вместе со встроенной базой данных о допустимых пределах контролируемых параметров. Другие модели используют спутниковый канал передачи данных и, в случае необходимости, имеют возможность связываться с «диагностическим центром» для получения достаточно полной информации о неисправности, возникшей на борту. Результатом работы бортовой диагностики является обнаружение неисправности, если

она фактически возникла, и оповещение водителя о ее характере. В соответствии с обнаруженной неисправностью выдается рекомендация о возможности дальнейшей эксплуатации автомобиля.

Вместе с этим рассмотрение основной задачи автотранспорта с позиции условия безотказной работы автомобиля показывает, что бортовая диагностика, как бы она ни была полезна, не удовлетворяет данному условию. Действительно, неисправность на борту, уже возникшая и выявленная диагностической подсистемой, является поводом для обращения в ремонтную службу, что противоречит продолжению рейса в штатном режиме. В этой связи опытный водитель, независимо от функционирования бортовой диагностики, все равно следит за работой узлов и агрегатов автомобиля, «чувствуя» по каким-то «неуловимым признакам» необходимость изменения режима его эксплуатации до того, как возникает реальная неисправность. Можно утверждать, что водитель некоторым образом прогнозирует поведение автомобиля, и в этом выражается один из аспектов интеллектуальной деятельности водителя при управлении автомобилем.

Для опытного водителя, вообще говоря, безразлично, каким автомобилем он управляет. Приняв управление новым для него автомобилем, той же модели, что и раньше, или другой, водитель быстро «осваивается» с этим автомобилем (здесь мы не рассматриваем субъективные предпочтения водителя) и реализует привычные для себя качество и стиль управления.

Никакая диагностическая система не может воспроизвести этих особенностей работы водителя, так как функциональным назначением диагностиче-

ской системы является выявление уже имеющейся неисправности на борту, но не ее предотвращение. В этой связи выявляется необходимость разработки бортовой автоматизированной системы поддержки предотвращения возникновения и развития «аварийных» процессов в автомобиле в течение рейса. Данная система должна обладать признаками искусственного интеллекта, так как ее функционирование, в определенном смысле, аналогично рассмотренной выше интеллектуальной деятельности водителя.

Как правило [2], интеллектуализация автоматизированных технических систем применяется для поддержки принятия решения оператором объекта управления (ОУ), причем целью управления является поддержание требуемого режима функционирования ОУ, что способствует оптимизации управляемых процессов, повышению безопасности ОУ и т. д. Частным случаем функционального назначения интеллектуальных систем управления (ИСУ) является анализ параметров процессов, протекающих в ОУ, и на этом основании прогнозирование возможного выхода их из штатных заданных технологией пределов, а также прогнозирование возможного выхода из строя оборудования ОУ. В соответствии с вычисленным прогнозом, если необходимо, синтезируется оповещение — рекомендация оператору ОУ к изменению режима функционирования ОУ (разумеется, в пределах используемой технологии), предотвращающему или исключающему развитие аварийной (нештатной) ситуации.

Особенность данного случая применения ИСУ заключается в том, что при успешном функционировании ИСУ прогнозируемый штатный режим ОУ вообще не должен быть достигнут. В этой связи применение таких автоматизированных ИСУ оказывается эффективным в технических системах, в которых возможное изменение режима их функционирования не изменяет их функционального назначения и не ухудшает их функциональных свойств. К таким техническим системам относится автомобиль (также и иные разнообразные транспортные средства, кроме трубопроводного и конвейерного транспорта).

Как принято в настоящее время [3], к классу интеллектуальных систем автоматизированного или/и автоматического управления относятся системы, которые позволяют проводить их обучение, адаптацию или настройку за счет запоминания и анализа информации о поведении объекта вместе с его системой управления (СУ) в условиях внешних воздействий. Особенностью таких систем является наличие БД и машины логического вывода, которые составляют базу знаний данной ИСУ, а также подсистемы интерфейсов и др. ИСУ используются для управления плохо формализованными или сложными техническими объектами.

Основные признаки ИСУ: а) наличие взаимодействий СУ с реальным внешним миром посредством

Кто никогда не совершал ошибок, тот никогда не пробовал что-то новое.

Альберт Эйнштейн

каналов связи; б) открытость системы, позволяющая пополнять и приобретать знания; в) применение алгоритмов прогноза изменений среды функционирования СУ; г) неточность или недостаток информации об объекте управления (ОУ) могут быть компенсированы за счет повышения интеллектуализации алгоритма управления; д) сохранение функционирования при разрыве связи с внешним миром. Под «повышением интеллектуализации» здесь понимается применение специальных алгоритмов для определения моделей ОУ, которые могут быть определены только в процессе штатного функционирования ОУ в режиме РВ. Обычно для систем автоматического или автоматизированного управления необходимые модели строятся разработчиками этих систем. При измерении, соответствующей обработке и применении в ИСУ индивидуальных параметров ОУ — «калибровке» ОУ, полученные значения полностью соответствуют данному ОУ. Это является одним из факторов адаптации ИСУ к данному ОУ. Обычно для однотипных ОУ применяются «стандартные» значения параметров, заданные изготовителем, но в реальности разнящиеся от экземпляра к экземпляру.

Представленная ИСУ является системой поддержки принятия решения водителем по режиму эксплуатации автомобиля в течение рейса [4], так как применение автоматического управления автомобилем [5] в процессе совершения рейса при современной организации эксплуатации автомобиля в большинстве случаев невозможно. В соответствии с этим ИСУ идентификации технического состояния автомобиля как комплекса взаимосвязано функционирующих узлов и прогнозирования эволюции их функционирования в масштабе РВ должна дополнить возможности бортового маршрутного компьютера. Данная автоматизированная ИСУ не заменяет бортовой диагностической системы, но придает бортовому маршрутному компьютеру качество специализированного технического интеллекта.

Результатом работы ИСУ на всем протяжении рейса является формирование и выдача рекомендаций водителю о желательном изменении режима эксплуатации автомобиля в соответствии с текущим прогнозом возможного выхода параметров работы контролируемых узлов из оптимальных или/и допустимых пределов.

Контролируемые параметры узлов:

— для двигателя, трансмиссии и системы охлаждения — уровень горючего в баке, а также в соответствии с величиной нажатия педали газа: давление горючего в системе питания, температура головок цилиндров, температура трансмиссии (картера), температуры охлаждающей жидкости на входе/выходе

рубашки охлаждения, уровень охлаждающей жидкости, давление, уровень и температура масла, коэффициент детонации, обороты вала трансмиссии;

- для сцепления (в соответствии с величиной нажатия педали сцепления) — температура узла сцепления, длительность нажатия педали сцепления (> 10 мин) и коэффициент сцепления совместно с контролем средних оборотов колес;

- для тормозной системы (в соответствии с величиной нажатия педали тормоза) — значения температуры тормозных узлов (для каждого колеса);

- для электрооборудования — значения температуры аккумулятора и генератора, напряжение на зажимах аккумулятора и генератора, суммарный потребляемый ток, наличие утечек электричества в сети электроснабжения, включенность/отключенность потребителей, режим работы узла зажигания (наличие импульсов зажигания и угол опережения — кроме дизельных двигателей) или режим включения форсунок (для дизелей).

Кроме этих параметров также определяется текущее значение коэффициента сцепления колес с дорожным покрытием — анализируется качество дороги (только при применении ИСУ совместно с GPS-контролем скорости автомобиля). Данные характеристики соответствуют параметрам, используемым в разных моделях маршрутных диагностических компьютеров — se50v-2-small, Multitronics, Престиж, «Штат UniComp», CheckEngine и др.

Прогноз рассчитывается каждые 3 секунды для значимых непрерывных параметров (температуры, давления, шума и пр.) каждого контролируемого узла на интервал упреждения 5 минут. Такая величина упреждения полагается достаточной, чтобы водитель, занятый отслеживанием дорожной обстановки и управлением автомобилем, успел понять смысл соответствующей рекомендации и предпринять оперативные действия, позволяющие сохранить штатный режим функционирования автомобиля.

К настоящему времени разработки подобной системы поддержки принятия решений водителем не известны.

Функциональность ИСУ:

- построение (и модификация) калибровочной таблицы индивидуальных «стандартных» параметров данного автомобиля (реализована функция адаптации к особенностям данного экземпляра автомобиля);

- оперативная идентификация текущего состояния автомобиля по результатам измерений значимых параметров в течение рейса (реализованы функции связи с внешней средой и оперативной настройки СУ в модулях модели ОУ);

- оперативное прогнозирование эволюции значимых параметров на интервал времени, достаточный для принятия водителем решения об изменении режима эксплуатации автомобиля (реализована функция прогнозирования «состояния» ОУ, как среды функционирования СУ);

- вычисление текущего значения контролируемого параметра по алгоритму «виртуального датчика» в случаях, когда от соответствующего датчика, установленного на автомобиле, получение информации невозможно (реализована функция «виртуальный датчик», поддерживающая функционирование ИСУ при нарушении связи с внешней средой);

- оценка результатов прогноза, синтез и выдача рекомендаций водителю (реализована функция интерфейса водителя как лица, принимающего решения).

Кратко рассмотрим особенности реализации ИСУ. Задачи идентификации и прогнозирования состояния узлов автомобиля циклически решаются на всем протяжении рейса. Построение индивидуальной калибровочной таблицы параметров выполняется для нового автомобиля, после техобслуживания и/или ремонта, а также с учетом естественного процесса изменений индивидуальных «стандартных» значений параметров из-за износа деталей повторение калибровки возможно в период штатной эксплуатации.

Исполнительные механизмы и узлы автомобиля инерционны, они интегрируют управляющие воздействия, поступающие на них со стороны водителя и внешней среды [6]. Этим определяется возможность вычисления прогноза значений контролируемых параметров экстраполяцией функций их изменений, так как поведение функций их эволюции на известном интервале и на интервале экстраполяции практически одинаково [7]. При этом, так как во время рейса воздействия подаются на автомобиль неравномерно, изменения значений контролируемых параметров имеют характер случайных колебаний.

Функции изменения значений контролируемых параметров заданы в табличной форме (в виде трендов) значениями, полученными и получаемыми в РВ от датчиков, установленных в узлах автомобиля. На этом основании, и имея в виду приведенные выше свойства процессов, в качестве аналитической (точнее, «псевдоаналитической») модели функций изменений значений контролируемых параметров (аналитическое задание этих функций необходимо для вычисления прогнозов экстраполяцией), выбрана запись тригонометрического ряда Фурье [8]. Эти ряды обладают свойством неизменности спектра колебаний с их амплитудами, чем обуславливается неизменность поведения соответствующей функции на требуемом интервале. Применением дискретного преобразования Фурье (ДПФ) к таблично заданным функциям изменений контролируемых параметров эти функции преобразуются в аналитические формы (в виде амплитуд колебаний спектральных разложений).

Тренды контролируемых параметров сохраняются в памяти бортового компьютера в качестве протокола технического состояния автомобиля в течение рейса. Так как при определенной инерционности процес-

сов в автомобиле их характер (случайных колебаний) меняется со временем в соответствии с динамикой управляющих воздействий водителя и свойствами дороги, то данные для идентификации подвержены дисконтированию, а значимость участков трендов для относительно отдаленного прошлого резко снижена. Имея это в виду, а также в соответствии с требованиями алгоритма ДПФ (используется алгоритм оконного быстрого преобразования Фурье — БПФ), для идентификационных расчетов применяются последние 256 отсчетов каждого контролируемого параметра, то есть БПФ преобразует тренды в скользящем прямоугольном временном окне (в интервале анализа).

При длительности цикла измерений 3 секунды тренды обрабатываемой длины формируются за интервал около 12 мин, что дает удовлетворительное качество прогноза для интервала экстраполяции, не превышающего 5 мин. Таким образом, водитель получит рекомендацию к изменению режима эксплуатации автомобиля с 5-минутным упреждением возможного достижения автомобилем нежелательного состояния.

На основании разложений, полученных применением БПФ, вычисление прогнозов не представляет трудности. Так как частотные спектры и соответствующие частотам амплитуды известны, то прогнозируемые значения $p_k | k=1,2,\dots$ параметров получаются вычислением по следующей формуле:

$$p_k = \sum_{j=j_{\min}}^{j_{\max}} A_{jk} \sin(2\pi\mu \{v_{jk}(T + \Delta t)\}),$$

где j_{\min} — индекс значения частоты низшего колебания в Фурье-разложении тренда k -го параметра, j_{\max} — индекс значения частоты высшего колебания в Фурье-разложении тренда k -го параметра, A_{jk} — значение амплитуды j -й частоты колебания в Фурье-разложении для данного параметра, v_{jk} — значение j -й частоты колебания в разложении для k -го параметра, T — временная ширина окна, Δt — интервал экстраполяции — прогнозирования, μ — масштабный коэффициент (зависит от выбранного алгоритма оконного преобразования Фурье и временного масштаба данных), скобки $\{*\}$ обозначают функцию взятия дробной части от $*$. Обратное преобразование Фурье не применяется, так как получения промежуточных значений параметров на интервале прогнозирования не требуется. Также не требуется коррекция вычисляемых дробных частей — начальных фаз колебаний при достаточно точном задании суммарного интервала.

Алгоритм формирования калибровочной таблицы основан на методе наименьших квадратов (МНК). С началом эксплуатации нового автомобиля или после технического обслуживания в течение 0,5...48 ч и более рабочего времени тренды контролируемых параметров, сохраняемые в качестве протокола тех-

нического состояния автомобиля, обрабатываются МНК со смыслом решения переопределенной системы линейных уравнений. Получаемые при этом «средние» и граничные значения параметров заносятся в калибровочную таблицу, соответственно диапазонам оборотов коленчатого вала и скоростей автомобиля, и составляют для каждого параметра «допустимые интервалы со средним». Кроме этого, в процедуре МНК формируются коэффициенты для «оценочной линейной формы», связывающей некоторые из прогнозируемых параметров [9]. Эта линейная форма применяется для обнаружения ситуаций «стечения обстоятельств».

С целью повышения качества рекомендации выполнено разделение калибровочной таблицы по трем температурным диапазонам. Температурные диапазоны выбраны следующими: $<-5^{\circ}\text{C}$, $-5...25^{\circ}\text{C}$ и $>25^{\circ}\text{C}$, в каждом из которых диапазоны оборотов: 0...500 об/мин, 500...1000 об/мин, 1000...1500 об/мин и т. д. до >5500 об/мин (как правило, верхнее значение оборотов вала двигателя не превышает 5600 об/мин, но может достигать 6000 об/мин). Диапазонам оборотов поставлено в соответствие множество диапазонов скоростей: 0...10 км/ч, 10...20 км/ч и т. д. до >150 км/ч с интервалом 10 км/ч. Эти калибровочные таблицы должны быть сформированы до начала решения основных задач, однако в качестве исходной калибровочной таблицы может быть заимствована уже имеющаяся для другого экземпляра автомобиля этой же или близкой модели.

Значения, полученные в результате прогнозирования, проверяются на принадлежность допустимым интервалам, содержащимся в калибровочной таблице. При обнаружении выхода прогнозируемого значения параметра за допустимые пределы, синтезируется соответствующее случаю сообщение — рекомендация водителю для коррекции режима эксплуатации автомобиля. Для обнаружения ситуаций «стечения обстоятельств», когда прогнозируемые значения некоторых параметров, допустимы по отдельности, но недопустимы в их сочетании, предусмотрено вычисление значений комплексных оценок прогнозируемых состояний с применением «оценочной линейной формы». Значения комплексных оценок не должны выходить за установленные пределы.

Особое внимание при разработке алгоритма автоматизации уделено обработке случаев выхода из строя датчиков контролируемых и прогнозируемых параметров. Предложены три варианта обработки таких случаев. В наиболее простом варианте значение параметра выбирается из калибровочной таблицы в соответствии со значениями оборотов и текущей скорости автомобиля. В более сложном варианте значение параметра вычисляется экстраполяцией (с применением МНК) тренда данного параметра на интервал $\Delta t = 3$ с. В третьем, предпочтительном варианте требуемое значение вычисляется в обычной процедуре прогнозирования

с использованием разложения Фурье, выполненного в предыдущем цикле идентификации для данного параметра также для $\Delta t = 3$ с.

Объем оперативной памяти бортового маршрутного компьютера, необходимый для хранения обрабатываемых данных, — ≤ 512 Кб.

Выводы

1. Предложенная интеллектуальная автоматизированная система идентификации и прогнозирования технического состояния автомобиля в течение рейса соответствует рекомендациям, приведенным в [10]. Однако в реализации настоящей ИСУ применена индивидуальная адаптация к данному экземпляру автомобиля, чем улучшаются результаты прогнозирования значений контролируемых параметров. Кроме этого, использованием в реализации настоящей ИСУ алгоритма идентификации с применением оконного БПФ практически исключаются случаи ложных сообщений водителю или, наоборот, пропуска возможных критических ситуаций.

Предложенная автоматизированная система используется в составе ПО новых серийно выпускаемых предприятием ООО «Штат» (Самарская обл., г. Тольятти) интеллектуальных бортовых маршрутных компьютеров «Штат UniComp», а также в составе компьютеризированного испытательно-диагностического стенда двигателей внутреннего сгорания (ДВС) на предприятии ООО «ШАКО» (Самарская обл., г. Тольятти), что позволило исключить неконтролируемый выход оборудования из строя (см. ниже).

2. Предложенная ИСУ не является диагностической, так как предназначена для исключения возможных неисправностей. В отличие от этого любая диагностическая система предназначена для выявления неисправностей уже фактически имеющих.

Так, применение данной ИСУ в составе испытательно-диагностического стенда ДВС предоставило возможность определять начало развития неконтролируемого «аварийного» процесса и оперативно изменять план испытаний, чем предотвращалось достижение аварийного состояния двигателем и/или оборудованием стенда, а также позволило регистрировать условия возникновения и развития «аварийного» процесса. В штатный состав электро-механических агрегатов стенда входят ДВС (вместе с системой охлаждения) и асинхронный электродвигатель 5 кВт (ЭД) для запуска ДВС и для создания нагрузочного момента на валу работающего ДВС. Соответственно в состав контролируемых параметров включены потребляемый ЭД электроток и температура обмоток ЭД, перегреваемых при длительной большой нагрузке. Одновременно

некоторые параметры, относящиеся к функционированию ИСУ, из состава ПО бортового компьютера автомобиля исключены (например, температуры тормозных узлов колес).

3. Анализ назначения систем автоматизации управления автомобилем: бортовая система управления режимом работы двигателя, бортовая навигационная система, бортовая система безопасности, бортовая система пожаротушения и др., показывает, что предложенная ИСУ не дублирует функции остальных систем и может быть включена в состав системы автоматизации эксплуатации автомобиля наравне с остальными.

Данная система частично обеспечивает внутреннюю функциональную безопасность автомобиля, так как улучшение (частичная оптимизация) режимов функционирования его узлов имеет следствием возрастание его функциональной надежности. Под внутренней функциональной безопасностью и функциональной надежностью технической системы здесь понимаются соответственно способность данной системы к нейтрализации разрушительных состояний, относящихся к функциональному назначению системы и возникающих по внутренним причинам, или нечувствительность системы к таким состояниям и способность к сохранению функционального назначения системы в условиях различных разрушительных воздействий или нечувствительность системы к таким воздействиям.

Список литературы

1. Анисимов А.П., Юфин В.К. Экономика, организация и планирование автомобильного транспорта. М.: Транспорт, 1986.
2. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. М: СИНТЕГ. 1998.
3. Ульянов С.В., Литвинцева Л.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А. Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений. 1. PronetLabs, 2011.
4. Герасимов А.В., Дмитренко Л.Г. Автоматизированная система оперативной идентификации и прогнозирования состояния автомобиля в течение рейса // Автоматизация в промышленности. 2008. № 3.
5. Петров В.А. Теория автомобиля. М.: МГОУ, 1996.
6. Красовский А.А. Динамика непрерывных самонастраивающихся систем. М.: 1963.
7. Мишулина О.А. Статистический анализ и обработка временных рядов. М.: МИФИ. 2004.
8. Ванник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. М.: Наука. 1979.
9. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: ИМ СО РАН. 1999.
10. Морозовский Ю.Я. Об идеологии интеллектуальных систем управления АТС // Автомобильная промышленность. 2007. №10.

*Бахтадзе Наталья Николаевна — д-р техн. наук, проф., заведующий лабораторией,
Дмитренко Лариса Григорьевна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,
Герасимов Александр Владимирович — инженер ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН.
Контактный телефон (495) 334-88-70.*