

# СОВЕРМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — ТРАНСПОРТУ

УДК 629.113.004.67

## Диагностирование газоздушного тракта тепловозного дизеля с использованием интеллектуального классификатора

В. В. Грачев<sup>1</sup>, М. В. Федотов<sup>2</sup>, А. В. Грищенко<sup>1</sup>, Ф. Ю. Базилевский<sup>1</sup>,  
А. Л. Шарапов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

<sup>2</sup>Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (АО «ВНИКТИ»), Российская Федерация, 140402, Московская обл., г. Коломна, ул. Октябрьской революции, 410

**Для цитирования:** Грачев В. В., Федотов М. В., Грищенко А. В., Базилевский Ф. Ю., Шарапов А. Л. Диагностирование газоздушного тракта тепловозного дизеля с использованием интеллектуального классификатора // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 2. — С. 124–140. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-124-140

### Аннотация

**Цель:** Повышение эффективности оперативного контроля технического состояния газоздушного тракта (ГВТ) тепловозного дизеля, оценка возможности использования штатных измерительных средств тепловоза для контроля технического состояния ГВТ дизеля и обоснование целесообразности расширения перечня параметров ГВТ, контролируемых средствами бортовой диагностики тепловоза. **Методы:** Для определения класса текущего технического состояния (ТС) ГВТ используется интеллектуальный классификатор на основе алгоритма *Support Vector Machine (SVM)*. Обучающая выборка объемом 96 образцов для восьми классов ТС ГВТ сформирована с использованием программного комплекса «Дизель-РК». Исследовались три варианта структуры классификатора, отличающихся набором компонент вектора входных параметров: штатный с двумя входами (степень повышения давления в нагнетателе  $\pi_k$  и температура отработавших газов перед турбиной  $T_T$ ), расширенный с дополнительным контролем частоты вращения ротора турбокомпрессора  $n_{TK}$  и, предлагаемый, с контролем мгновенного расхода воздуха  $g_s$  дизелем вместо  $n_{TK}$ . Качество модели оценивалось перекрестной валидацией по пяти фрагментам и результатами классификации тестовой выборки, не использовавшейся при обучении. **Результаты:** Точность классификации тестовой выборки классификатором со штатным набором входных параметров не превышает 41 %. Расширение перечня контролируемых параметров за счет включения в него частоты вращения  $n_{TK}$  ротора турбокомпрессора не сказывается заметным образом на эффективности системы диагностики, повышая точность диагностирования только до 43 %. В то же время замещение частоты вращения ротора

мгновенным расходом воздуха  $g_s$  повышает точность классификации тестовой выборки до 91 %. **Практическая значимость:** Подтверждена эффективность использования методов машинного обучения для оперативного контроля технического состояния ГВТ дизеля при условии оптимизации перечня параметров дизеля, контролируемых средствами бортовой диагностики тепловоза. С целью повышения эффективности контроля рекомендуется ввести в этот перечень мгновенный расход воздуха дизелем с одновременным исключением из него частоты вращения ротора турбокомпрессора.

**Ключевые слова:** Газовоздушный тракт, турбокомпрессор, глушитель, нагнетатель, рабочий процесс, дизель, диагностирование, техническое состояние, классификатор, обучающая выборка, датчик, расход воздуха.

## Постановка задачи

Газовоздушный тракт (ГВТ) транспортного дизеля с газотурбинным наддувом (рис. 1) является одной из наиболее важных и ответственных систем двигателя, во многом определяющей его надежность и экономичность в эксплуатации.

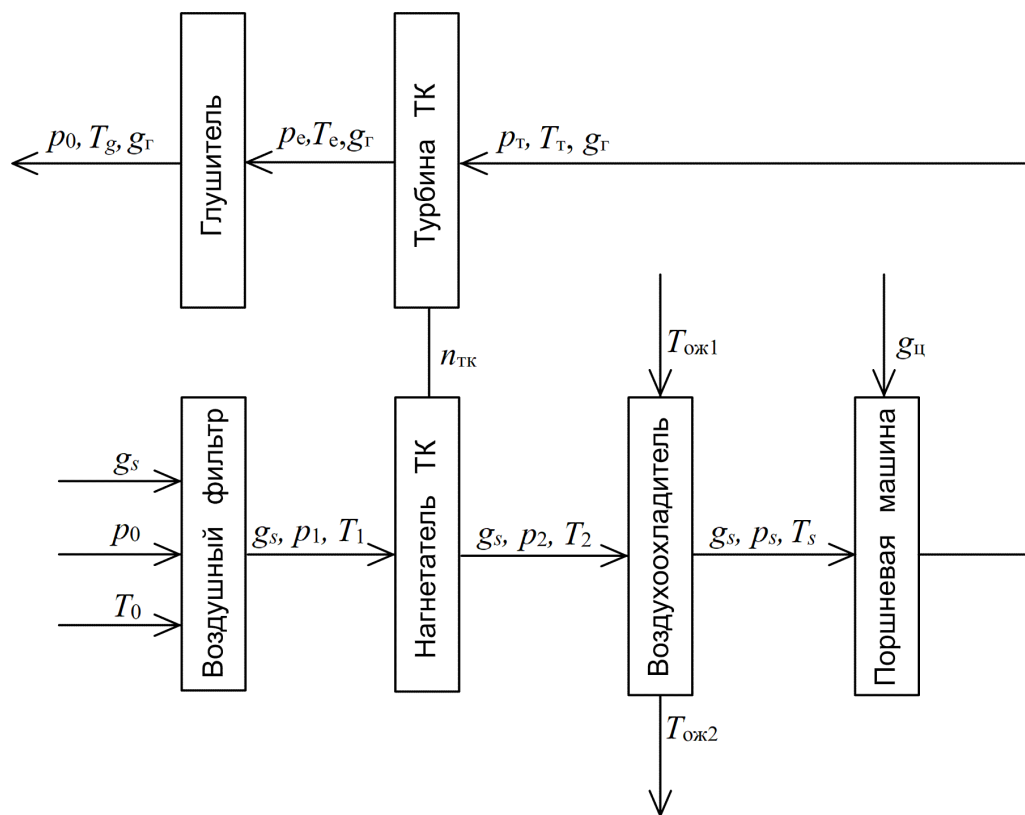


Рис. 1. Схема ГВТ дизеля с одноступенчатым газотурбинным наддувом:

$p_0, T_0$  — давление и температура окружающей среды;  
 $g_s, g_g$  — мгновенный массовый расход воздуха и отработавших газов;  
 $g_{ц}$  — цикловая подача топлива;  $T_{ож1}, T_{ож2}$  — температура охлаждающей жидкости;  
 $p_1, p_2, p_s, T_1, T_2, T_s$  — давление и температура воздуха в различных сечениях ГВТ;  
 $p_t, p_e, T_t, T_e, T_g$  — давление и температура отработавших газов в различных сечениях ГВТ

ВТ приходится до 24 % всех элементных отказов тепловозных дизелей [1], причем развитие большинства отказов носит постепенный характер и не может быть своевременно обнаружено средствами штатного контроля состояния силовой установки тепловоза. Параметрические отказы ГВТ приводят к снижению экономичности дизеля, способствуют снижению работоспособности узлов и могут являться причиной выхода из строя не только элементов самого тракта, но и вызвать тяжелые отказы цилиндропоршневой группы дизеля [2, 3].

В то же время перечень средств и методов, используемых в настоящее время для рабочего диагностирования агрегатов ГВТ как в процессе эксплуатации тепловоза, так и в процессе послеремонтных испытаний, весьма ограничен.

На тепловозах прежних лет выпуска единственным параметром, используемым для контроля состояния ГВТ дизеля как в процессе эксплуатации, так и при проведении послеремонтных реостатных испытаний, является давление воздуха во впускном коллекторе  $p_s$  (рис. 1), измеряемое стрелочным пружинным манометром. На тепловозах нового поколения, оборудованных микропроцессорной системой управления (МСУ) с подсистемой бортовой диагностики, перечень параметров для контроля технического состояния ГВТ, помимо давления  $p_s$ , включает частоту вращения ротора турбокомпрессора  $n_{\text{ТК}}$  и температуру газов на входе в турбину  $T_t$ . Все три параметра контролируются с использованием датчиков давления, результаты контроля сохраняются в общем массиве диагностической информации, регистрируемой подсистемой бортовой диагностики.

Эти же параметры используются для контроля состояния ГВТ дизеля в процессе реостатных испытаний тепловоза, поскольку ни один из стационарных или локальных диагностических комплексов, применяемых в настоящее время для тестовой диагностики дизеля в процессе испытаний [4], не включает средств диагностики ГВТ.

Исключение составляет комплекс диагностики и настройки дизелей (КДН) «Магистраль» [5], в котором эта задача решается в полной мере при условии установки на дизель в процессе подготовки его к испытаниям одиннадцати дополнительных датчиков, контролирующих различные параметры ГВТ. Необходимость выполнения значительного объема дополнительных операций при подготовке дизеля к испытаниям в сочетании с высокой стоимостью комплекса в полной комплектации ограничивает применение его в сервисных локомотивных депо.

Целями настоящей работы являются, во-первых, оценка возможности использования штатных измерительных средств тепловоза для контроля технического состояния ГВТ дизеля и, во-вторых, обоснование целесообразности расширения перечня параметров ГВТ, контролируемых подсистемой бортовой диагностики МСУ.

## Исходные данные для решения задачи

С целью определения влияния характерных отказов ГВТ на значения его параметров выполнено моделирование рабочего процесса комбинированного дизеля с газотурбинным наддувом типа 1-ПД4Д (6ЧН31,8/33,0) при различных состояниях агрегатов ГВТ и топливной аппаратуры дизеля в программном комплексе «Дизель-РК» [6] с дополнительным модулем расчета параметров системы наддува. Описание классов технического состояния (ТС) ГВТ и соответствующих им отказов приведены в табл. 1, часть нормализованных результатов моделирования с разметкой классов представлена на рис. 2–7.

Как следует из рисунков, значение степени повышения давления в нагнетателе турбокомпрессора  $\pi_k$ , как и непосредственно связанная с ним величина давления воздуха во впускном коллекторе  $p_s$ , не могут использоваться в качестве единственного диагностического параметра при решении задач диагностирования и контроля технического состояния (ТС) ГВТ, поскольку ухудшение ТС может влиять на их значение противоположным образом в зависимости от вида отказа.

ТАБЛИЦА 1. Классы состояний ГВТ дизеля

№ класса	Описание класса	Изменение значений характерных параметров	Количество векторов в выборке
0	Исправное ТС	—	5
1	Закоксовывание глушителя 1-й степени. Загрязнение фильтра, загрязнение воздушной полости воздухоохладителя	Потери давления в глушителе 0,006–0,013 МПа	9
2	Закоксовывание глушителя 2-й степени. Загрязнение фильтра, загрязнение воздушной полости воздухоохладителя	Потери давления в глушителе 0,013–0,03 МПа	12
3	Закоксовывание соплового аппарата (СА) турбины 1-й степени	Коэффициент снижения проходного сечения СА 0,95–0,9	10
4	Закоксовывание соплового аппарата (СА) турбины 2-й степени	Коэффициент снижения проходного сечения СА 0,85–0,8	10
5	Нарушение качества рабочего процесса в цилиндре. Загрязнение водяной полости воздухоохладителя	Изменение угла опережения подачи топлива (ОПТ), износ отверстий соплового наконечника форсунки	30
6	Снижение КПД нагнетателя ТК 1-й степени	Коэффициент снижения адиабатного КПД нагнетателя ТК 0,95–0,9	10
7	Снижение КПД нагнетателя ТК 2-й степени	Коэффициент снижения адиабатного КПД нагнетателя ТК 0,85–0,8	10
ИТОГО объем выборки, векторов			96

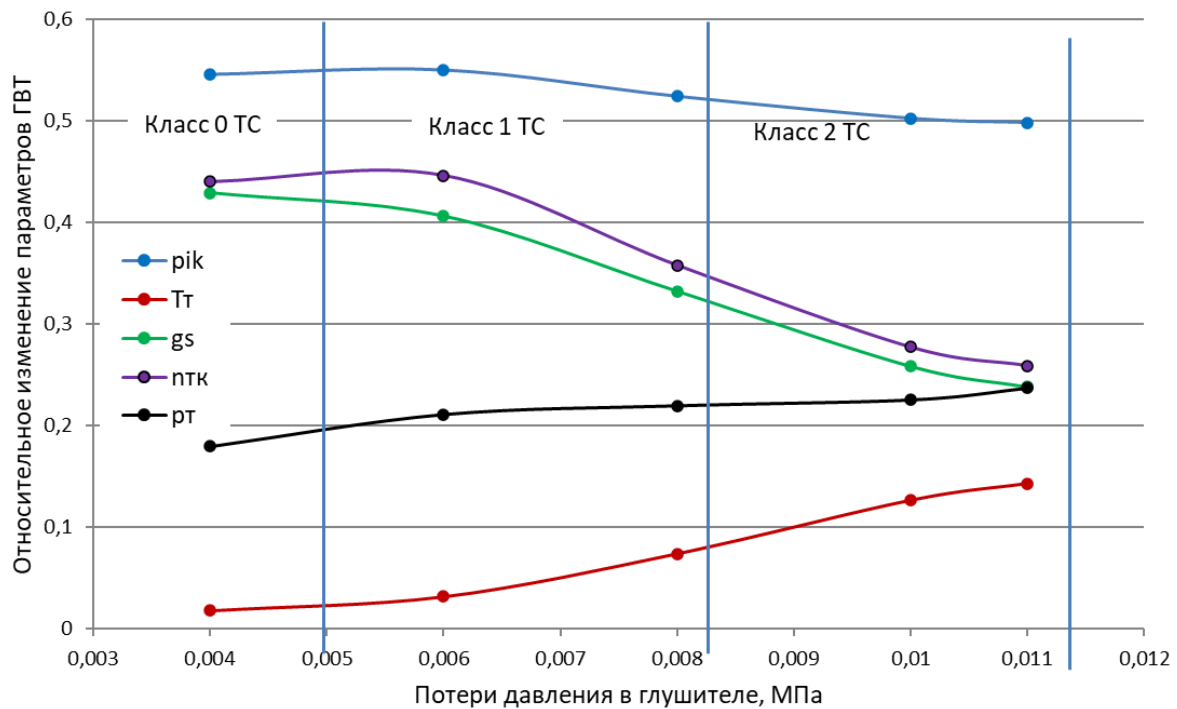


Рис. 2. Влияние степени закоксовывания глушителя на значения нормализованных параметров ГВТ в режиме  $n_d = 750$  об/мин,  $g_c = 0,8$  г/цикл.

$p_{ik}$  — степень повышения давления в нагнетателе турбокомпрессора;  
 $T_T$  — температура отработавших газов на входе в турбину;  $g_s$  — мгновенный массовый расход воздуха;  $n_{TK}$  — частота вращения ротора турбокомпрессора;  
 $p_T$  — давление газа перед турбиной.

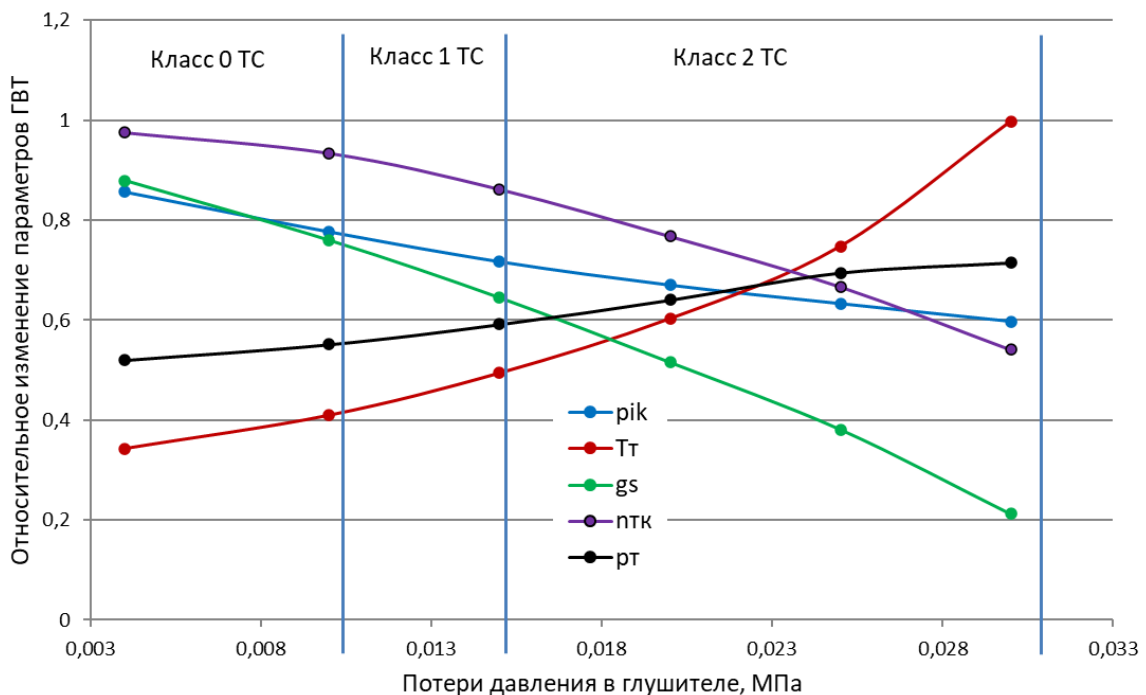


Рис. 3. Влияние степени закоксовывания глушителя на значения нормализованных параметров ГВТ в режиме  $n_d = 750$  об/мин,  $g_c = 1,435$  г/цикл

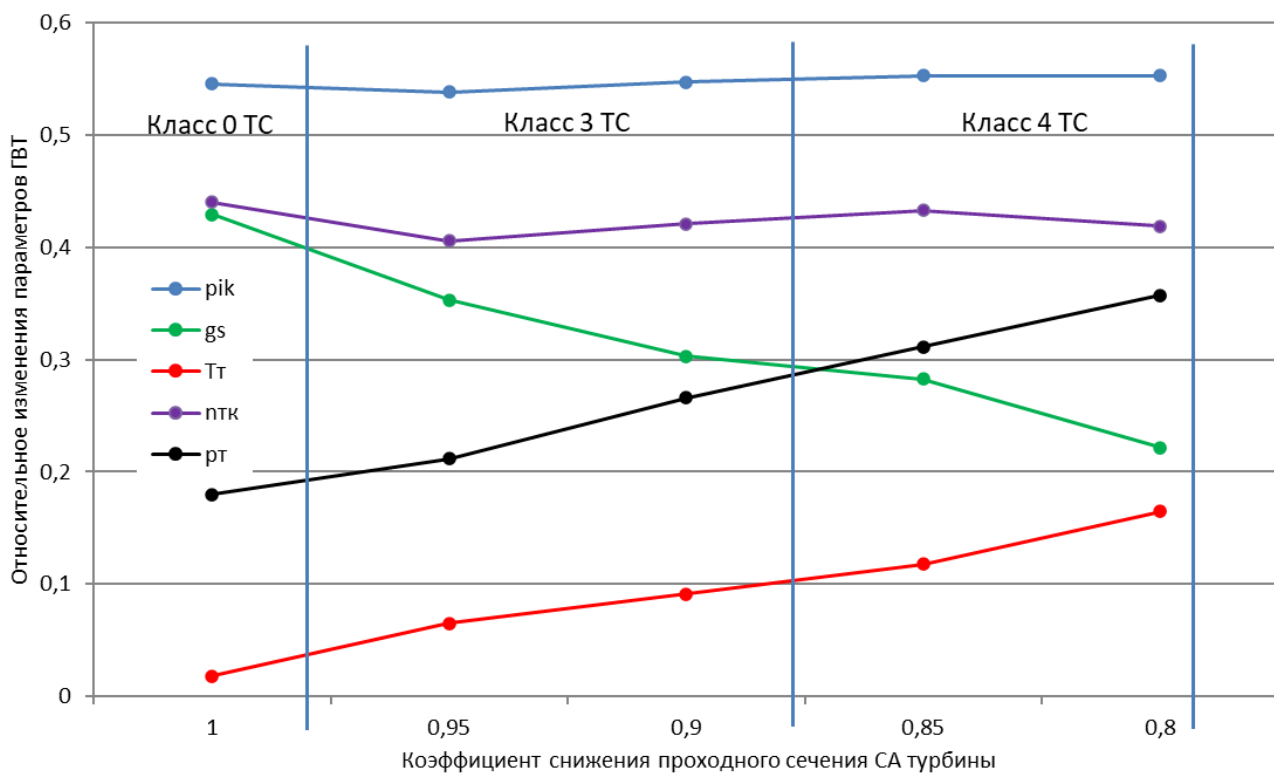


Рис. 4. Влияние степени закоксовывания соплового аппарата турбины на значения нормализованных параметров ГВТ в режиме  $n_d = 750$  об/мин,  $g_c = 0,8$  г/цикл

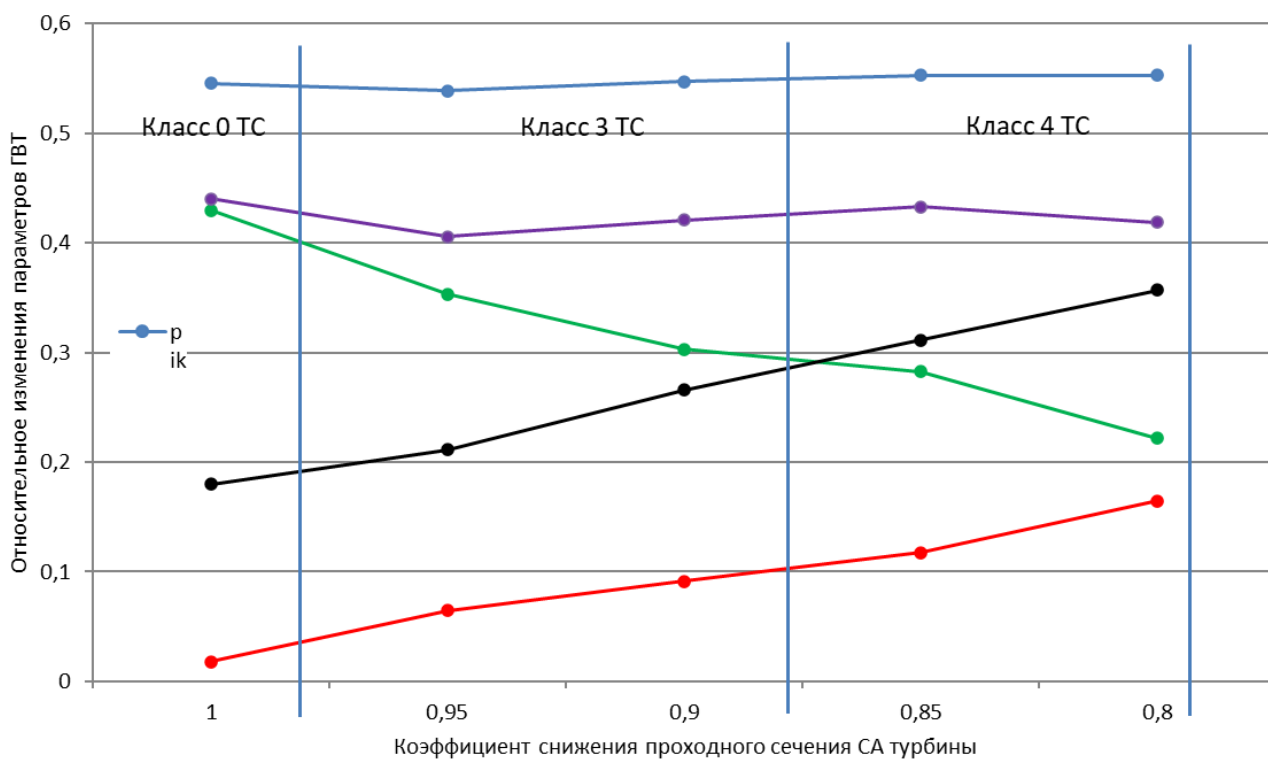


Рис. 5. Влияние степени закоксовывания соплового аппарата турбины на значения нормализованных параметров ГВТ в режиме  $n_d = 750$  об/мин,  $g_c = 1,435$  г/цикл

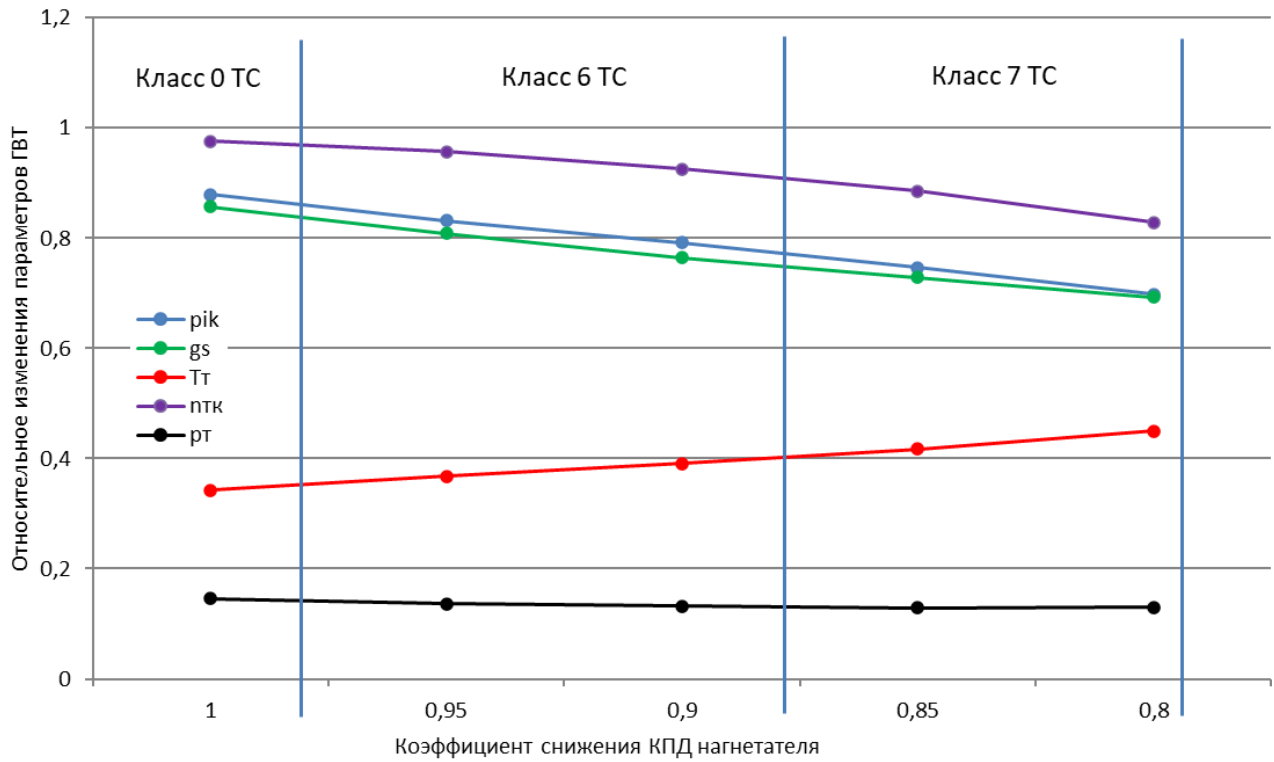


Рис. 6. Влияние снижения адиабатного КПД нагнетателя на значения нормализованных параметров ГВТ в режиме  $n_d = 750$  об/мин,  $g_c = 1,435$  г/цикл

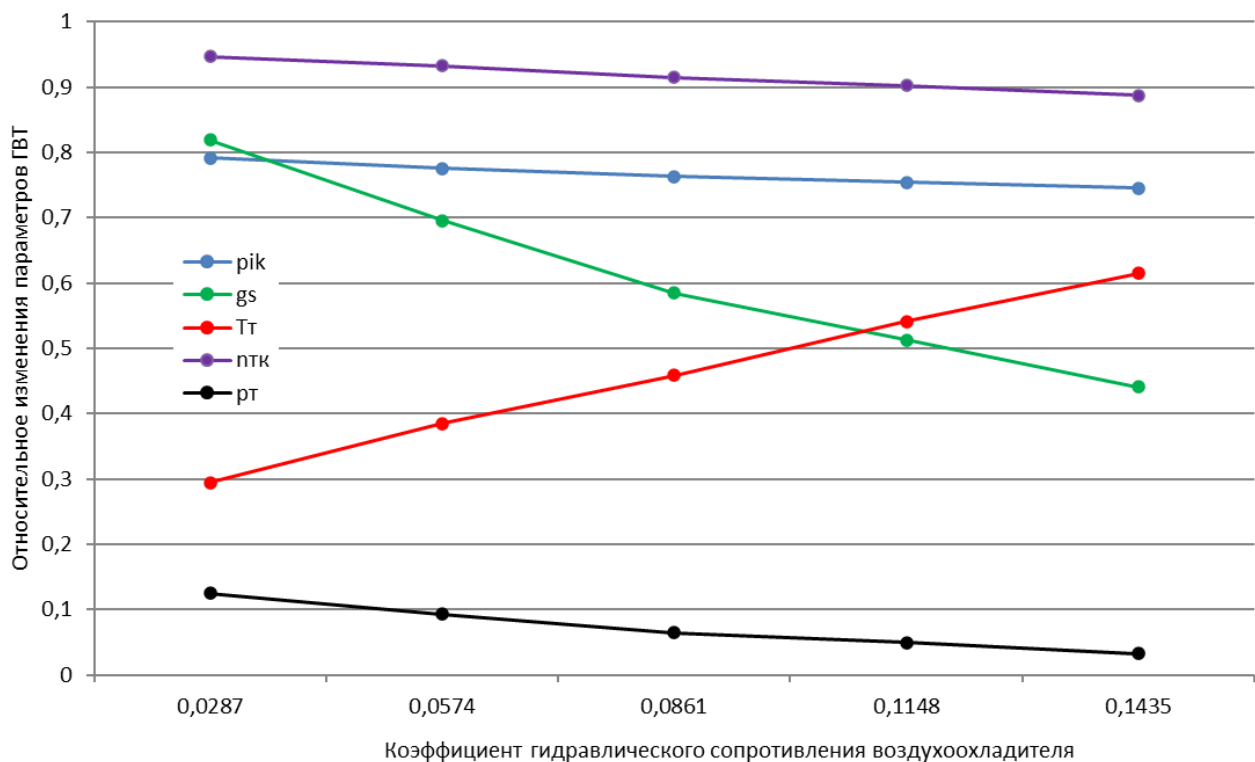


Рис. 7. Влияние загрязнения воздушной полости воздухоохладителя на значения нормализованных параметров ГВТ в режиме  $n_d = 750$  об/мин,  $g_c = 1,435$  г/цикл

ТАБЛИЦА 2. Фрагмент размеченной обучающей выборки

$g_s$ , кг/с	$\pi_k$	$n_{TK}$ , об/мин	$T_T$ , гр. К	$p_T$ , МПа	$n_d$ , об/мин	$g_{ц}$ , г	Класс ТС
2,1427	1,6	15903	706,6	0,1482	750	1,435	0
1,6547	1,445	14755	701,9	0,1459	750	1,15	0
1,7318	1,475	15155	733,4	0,149	750	1,3	1
1,7474	1,462	15008	681	0,1446	750	1,15	1
1,3844	1,421	14277	825,1	0,1525	750	1,3	2
1,6891	1,45	14835	691,6	0,1456	750	1,15	2
1,9249	1,541	15716	704	0,151	750	1,3	3
1,8383	1,482	15264	670	0,1444	750	1,15	3
1,9279	1,635	15932	752	0,1647	750	1,437	4
1,8969	1,56	15791	712	0,1548	750	1,3	4
1,7523	1,442	14751	620	0,1394	750	0,95	5
2,0894	1,575	15850	686	0,1467	750	1,3	5
1,9759	1,512	15556	691	0,1442	750	1,3	6
1,8517	1,468	15117	665	0,1417	750	1,15	6
1,7162	1,427	14526	687	0,14271	750	1,15	7
1,525	1,376	13636	655	0,13905	750	0,95	7

Однако эти параметры являются важными диагностическими признаками, использование которых, совместно с другими параметрами ГВТ, позволяет решить указанные задачи.

Из результатов моделирования сформирована выборка векторов диагностических признаков ГВТ вида  $D = \{g_s, \pi_k, T_T, n_{TK}, p_T\}$ , где  $g_s$  — секундный расход

воздуха через цилиндры дизеля, кг/с,  $\pi_k = \frac{p_2}{p_1}$  — степень повышения давления в

нагнетателе турбокомпрессора,  $p_2, p_1$  — давление воздуха на выходе и входе нагнетателя, МПа,  $T_T$  — температура газов входе в турбину, К,  $n_{TK}$  — частота вращения ротора турбокомпрессора, об/мин,  $p_T$  — давление газа перед турбиной (табл. 2).

Выбор координат вектора  $D$  обусловлен наличием технической возможности и стоимостью контроля соответствующих параметров как в бортовой системе диагностики локомотива, так и в составе стационарных или локальных диагностических комплексов.



Общий объем выборки составил 96 векторов, распределение элементов выборки по классам состояния ГВТ приведено в табл. 1.

## **Метод решения задачи и основные результаты**

Сложность термогазодинамических процессов в агрегатах ГВТ дизеля и большое количество факторов, наряду с текущим ТС, влияющих на их протекание, при ограниченной размерности вектора контролируемых параметров, практически исключают возможность эффективного использования аналитических (расчетных) диагностических моделей ГВТ для контроля его технического состояния и локализации отказов.

В то же время указанные особенности ГВТ как объекта диагностирования (ОД) позволяют рассматривать в качестве альтернативного математического аппарата для построения диагностических моделей алгоритмы и методы машинного обучения. Их преимуществом является возможность определения параметров алгоритма (диагностической модели), отображающего значения независимых (входных) параметров ОД на значения объясняющих (выходных) переменных, в качестве которых может использоваться терм-описание классов состояния ОД в результате обучения алгоритма. Последнее заключается в последовательном предъявлении модели (подаче на ее входы) векторов обучающей выборки с одновременной коррекцией изменяемых коэффициентов в зависимости от результатов сравнения ее отклика с эталонным значением объясняющей переменной [7].

Основная сложность использования моделей машинного обучения при решении задач диагностирования сложных и ответственных технических объектов, к которым относится тепловозный дизель, связана с формированием обучающей выборки [8]. Низкая контролепригодность силовых установок тепловозов, в особенности прежних лет выпуска, отсутствие непрерывного контроля параметров в процессе эксплуатации в сочетании с высокими абсолютными показателями их надежности чрезвычайно затрудняют процесс формирования обучающей выборки необходимого объема (как минимум 10–20 векторов параметров на каждый класс ТС ОД).

Одним из способов решения проблемы формирования обучающей выборки для диагностических моделей машинного обучения является расчет ее элементов для различных классов ТС с использованием развернутой аналитической модели ОД [8]. Нормализация значений компонентов векторов выборки позволяет уменьшить влияние индивидуальных особенностей ОД на величину объясняющей переменной. По мере получения реальных результатов диагностирования конкретных ОД обучающая выборка его модели дополняется новыми данными с последующим переобучением модели.

Из всего многообразия алгоритмов машинного обучения для решения задач технического диагностирования сложных объектов чаще всего используются алгоритмы классификации, обучаемые на выборках векторов контролируемых параметров ОД, соответствующих различным классам его состояния. При достаточном объеме обучающих выборок по каждому классу состояния такие классификаторы могут строиться на основе нейронной сети. При недостаточном объеме выборки, характерном для большинства задач диагностики, используются специальные алгоритмы классификации [7].

Как следует из данных табл. 1, на каждый класс состояния ГВТ в выборке, фрагменты которой представлены на рис. 1–4, приходится от пяти до тридцати векторов значений параметров ГВТ, что явно недостаточно для качественного обучения нейросетевого классификатора.

По этой причине в качестве алгоритма классификации состояния ГВТ используется метод опорных векторов (SVM) [9], одним из достоинств которого является возможность качественного обучения на выборках ограниченного объема.

С целью сравнительной оценки эффективности использования различных параметров ГВТ для контроля его технического состояния и локализации отказов исследовались три варианта структуры интеллектуального классификатора (рис. 8).

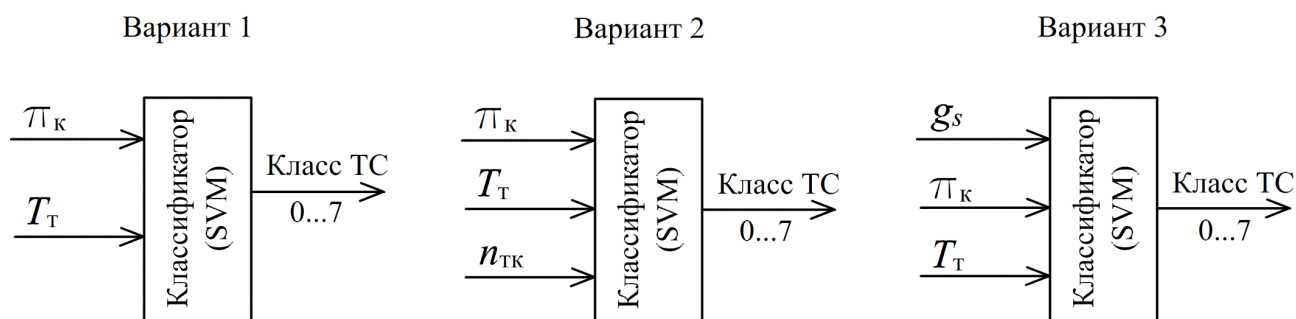


Рис. 8. Варианты структуры интеллектуального классификатора ТС ГВТ

В первом варианте перечень параметров, используемых для определения текущего класса состояния ГВТ, соответствует диагностическому обеспечению локомотивов прошлых лет выпуска, на которых, помимо пружинного манометра для измерения давления воздуха в ресивере дизеля, устанавливался дизельный термокомплект ТКД-50М [10] для измерения температуры отработавших газов на выходе из цилиндров и на входе в турбину.

Во втором варианте на вход классификатора подаются параметры ГВТ, контролируемые подсистемой диагностики современных локомотивов с электронным регулятором дизеля. Одной из его функций является измерение частоты вращения

ротора турбокомпрессора, причем исключительно для целей диагностирования, поскольку в алгоритме работы регулятора этот параметр не используется.

В третьем варианте классификатора вместо частоты вращения ротора турбокомпрессора в качестве входного параметра используется массовый расход воздуха дизелем  $g_s$ .

ТАБЛИЦА 3. Результаты обучения и тестирования моделей классификаторов ТС ГВТ

Классификатор	Результат кросс-валидации модели	Средневзвешенная $f1$ -мера на тестовой выборке
Вариант № 1	0,41	0,43
Вариант № 2	0,42	0,51
Вариант № 3	0,65	0,91

Как отмечалось выше, в качестве алгоритма классификации используется метод опорных векторов (SVM), с ядром  $rbf$  [9]. Предварительная оценка качества моделей выполнялась посредством пятикратной кросс-валидации с оценкой результатов посредством комплексной  $f1$ -меры [11]. Учитывая существенно отличное количество элементов выборки в разных классах (табл. 1), эта же метрика использовалась для оценки точности классификации на тестовой (15 % от общего объема) выборке.

Результаты работы классификаторов приведены в табл. 3.

## Обсуждение результатов

Как следует из табл. 3, возможность использования штатного набора измеряемых параметров ( $\pi_k, T_T$ ) для контроля текущего состояния ГВТ тепловозного дизеля весьма ограничена, поскольку средняя точность диагноза не превышает 43 %. Расширение перечня контролируемых параметров в подсистеме бортовой диагностики современных тепловозов за счет добавления к нему такого, на первый взгляд, информативного параметра, как частота вращения ротора турбокомпрессора, заметным образом на ситуацию не повлияло.

Однако такой результат является вполне ожидаемым, поскольку в центробежном компрессоре с пологими универсальными напорными характеристиками степень повышения давления  $\pi_k$  в области преимущественных режимов работы компрессора (вблизи линии ограничения по помпажу) практически не зависит от расхода  $g_s$  и является функцией частоты вращения ротора  $n_{TK}$  [3]. Таким образом, контроль частоты вращения в дополнение к степени повышения давления в компрессоре не несет новой информации о режиме работы агрегатов газотурбинного наддува и ГВТ в целом.

В то же время расход воздуха  $g_s$  является независимым параметром, определяющим текущий режим работы турбины и нагнетателя, потери давления в

пассивных элементах ГВТ (воздушный фильтр, воздухоохладитель, глушитель), а также качество рабочего процесса в цилиндрах поршневой машины дизеля. Поэтому использование его в качестве одного из диагностических признаков ГВТ резко повышает эффективность системы диагностирования, увеличивая ожидаемую точность диагноза на тестовой выборке до 91 % (табл. 3).

Наряду с решением задачи диагностирования непрерывный контроль мгновенного расхода воздуха дизелем обеспечивает возможность одновременного решения задачи оперативного параметрического контроля энергоэффективности силовой установки тепловоза [12]. Использование показателя энергоэффективности в качестве диагностического признака позволяет уточнить границы классов ТС ГВТ и открывает возможность прогнозирования его изменения.

Границы классов, описанных в табл. 1, и результаты классификации ТС ГВТ, приведенные в табл. 3, соответствуют вектору контролируемых параметров ГВТ, используемых в классификаторах вариантов 2 и 3 на рис. 8.

Алфавит классов ТС ГВТ, локализуемых классификатором, может быть существенно расширен за счет увеличения размерности вектора контролируемых параметров. Так, контроль перепадов давления воздуха на воздушном фильтре  $\Delta p_{\phi} = (p_0 - p_1)$  и воздухоохладителе  $\Delta p_{\text{во}} = (p_2 - p_s)$  при известном значении мгновенного расхода воздуха и температуры воздуха на входе в нагнетатель позволяет выделить в отдельные классы ТС ГВТ загрязнение фильтра и воздушной полости воздухоохладителя.

Степень повышения давления в компрессоре  $\pi_k$ , входящая в перечень входных параметров классификаторов вариантов 2 и 3 (рис. 8), должна вычисляться

как отношение давлений  $\frac{p_2}{p_1}$  (рис. 1), ни одно из которых не контролируется под-

системой диагностики тепловоза. Ее величина может приближенно оцениваться

отношением  $\frac{p_s}{p_0}$ , однако это приведет к «размытию» границ классов ТС ГВТ

в пространстве признаков и существенному снижению достоверности результатов диагностирования.

Наличие значений перепадов давлений на воздушном фильтре  $\Delta p_{\phi}$  и воздухоохладителе  $\Delta p_{\text{во}}$  позволяет вычислять истинное значение степени повышения

$\pi_k$  как отношение  $\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_s - \Delta p_{\text{во}}}{p_0 - \Delta p_{\phi}}$ , что повышает точность классификации ТС.

Таким образом, расширение перечня параметров ГВТ тепловозного дизеля, контролируемых подсистемой бортовой диагностики тепловоза, за счет включения в него мгновенного расхода воздуха и перепадов давления на воздушном

фильтре и воздухоохладителе существенно повышает возможности оперативного контроля и прогнозирования изменения ТС агрегатов ГВТ.

При этом частота вращения ротора турбокомпрессора  $n_{\text{ТК}}$  может быть исключена из перечня контролируемых параметров без заметного снижения точности классификации ТС.

Для непрерывного контроля расхода воздуха могут использоваться как специальные датчики, например термоанемометры [13], так и дифференциальные датчики давления, измеряющие перепад давления на участках воздушного тракта дизеля (например, на конфузоре центробежного нагнетателя [3]).

## Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Перечень параметров ГВТ тепловозного дизеля, контролируемых подсистемой бортовой диагностики современных тепловозов ( $p_s, T_T, n_{\text{ТК}}$ ), исключает возможность достоверного диагностирования ГВТ. Точность классификации состояния ГВТ на данном наборе параметров не превышает 51 %.

2. Контроль частоты вращения в дополнение к степени повышения давления в компрессоре (давлению в ресивере  $p_s$ ) не несет новой информации о режиме работы агрегатов газотурбинного наддува и ГВТ в целом, поэтому может быть исключен из перечня контролируемых параметров с целью снижения стоимости диагноза без существенного снижения точности классификации ТС ГВТ.

3. Расширение перечня параметров ГВТ тепловозного дизеля, контролируемых подсистемой бортовой диагностики тепловоза, за счет включения в него мгновенного расхода воздуха и перепадов давления на воздушном фильтре и воздухоохладителе существенно повышает возможности оперативного контроля и прогнозирования изменения ТС агрегатов ГВТ с увеличением точности его классификации до 91 % и более.

## Библиографический список

1. Свечников А. А. Совершенствование технологии контроля технического состояния агрегатов наддува тепловозного дизеля после ремонта: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. А. Свечников. — Самара, 2010. — 24 с.

2. Титанакон Д. А. Оценка технического состояния газоздушного тракта тепловозных дизелей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Д. А. Титанакон. — Омск, 2005. — 20 с.

3. Васин П. А. Исследование газоздушного тракта четырехтактного высокооборотного дизеля с турбонаддувом как объекта автоматической безразборной диагностики: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / П. А. Васин. — Ленинград, 1984. — 23 с.

4. Лобанов И. И. Повышение эксплуатационной эффективности тепловозных дизелей применением средств оперативной диагностики: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / И. И. Лобанов. — М., 2017. — 23 с.
5. Комплекс диагностики и настройки дизелей КДН «МАГИСТРАЛЬ»: сайт / ООО «Техтранс-Д». — Санкт-Петербург, 2022. — URL: <https://tehtrans-d.ru> (дата обращения 13.04.2022).
6. Кулешов А. С. Программа расчета и оптимизации двигателей внутреннего сгорания ДИЗЕЛЬ-РК. Описание математических моделей, решение оптимизационных задач / А. С. Кулешов. — М., МГТУ им. Баумана, 2004. — 123 с.
7. Черезов Д. С. Обзор основных методов классификации и кластеризации данных / Д. С. Черезов, Н. А. Тюкачев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: системный анализ и информационные технологии. — Воронеж, 2009. — № 9. — С. 25–29.
8. Федотов М. В. Предиктивная аналитика технического состояния систем тепловозов с использованием нейросетевых прогнозных моделей / М. В. Федотов, В. В. Грачев // Бюллетень результатов научных исследований. — СПб., 2021. — № 3. — С. 102–115.
9. Метод опорных векторов для стандартной задачи классификации. — URL: [www.machinelearning.ru/wiki/images/2/25/SMAIS11\\_SVM.pdf](http://www.machinelearning.ru/wiki/images/2/25/SMAIS11_SVM.pdf) (дата обращения: 14.04.2022).
10. Термокомплект дизельный ТКД-50М: сайт/ООО «Нева-Дизель». — СПб., 2022. — URL: <http://neva-diesel.com/mkd-50m-termodizelnyu-komplekt> (дата обращения: 14.04.2022).
11. Выбор метрики в машинном обучении. Как выбрать метрики для валидации результата Machine Learning. — М., 2022. — URL: <http://blog.dataalytica.ru/2018/05/blog-post.html> (дата обращения: 14.04.2022).
12. Грачев В. В. Прескриптивный контроль энергоэффективности тепловоза с использованием интеллектуальных методов обработки измерительной информации: монография / В. В. Грачев. — СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. — 2019. — 105 с.
13. Термоанемометр ТТМ-2-04. — СПб., 2022. — URL: [http://www.orbitalspb.ru/parametri\\_sredi/termoanemometry/anemometr\\_TTM2-04\\_portativnyi](http://www.orbitalspb.ru/parametri_sredi/termoanemometry/anemometr_TTM2-04_portativnyi) (дата обращения: 14.04.2022).

Дата поступления: 15.04.2022

Решение о публикации: 28.04.2022

#### **Контактная информация:**

ГРАЧЕВ Владимир Васильевич — д-р техн. наук, доц., проф.; [v\\_grach@mail.ru](mailto:v_grach@mail.ru)

ФЕДОТОВ Михаил Владимирович — канд. техн. наук, заведующий лабораторией;  
[fedotov-mv@vnikti.com](mailto:fedotov-mv@vnikti.com)

ГРИЩЕНКО Александр Васильевич — д-р техн. наук, проф.; [sanklok@mail.ru](mailto:sanklok@mail.ru)

БАЗИЛЕВСКИЙ Федор Юрьевич — канд. техн. наук, доц.; [f\\_basilevski@mail.ru](mailto:f_basilevski@mail.ru)

ШАРАПОВ Александр Леонидович — инженер-программист 1 кат.; [sharapov-al@vnikti.com](mailto:sharapov-al@vnikti.com)



# Locomotive Diesel Gas-Air Tract Diagnostics with the Use of Intellectual Classifier

V. V. Grachev<sup>1</sup>, M. V. Fedotov<sup>2</sup>, A. V. Grizhshenko<sup>1</sup>, F. Yu. Bazilevskiy<sup>1</sup>, A. L. Sharapov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I Petersburg State Transport University 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

<sup>2</sup>Scientific-Research and Constructive-Technological Institute of Rolling Stock (“BNIKTI” Corporation). 410 Oktyabr’skoy Revolucii ul., Kolomna, Moscow region, 140402, Russian Federation

**For citation:** Grachev V. V., Fedotov M. V., Grizhshenko A. V., Bazilevskiy F. Yu., Sharapov A. L. Locomotive Diesel Gas-Air Tract Diagnostics with the Use of Intellectual Classifier. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 2, pp. 124–140. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-124-140

## Summary

**Purpose:** Efficiency increase of operational monitoring of technical state of gas-air tract (GAT) of a locomotive diesel, assessment of possibility of using locomotive regular measuring tools to monitor diesel GAT technical state; feasibility justification for expanding the list of GAT parameters that are monitored by locomotive board diagnostics. **Methods:** An intelligent classifier based on *Support Vector Machine (SVM)* algorithm is used to determine the current technical condition (TC) class of GAT. Training sample of 96 item volume for eight classes of GAT TC was formed using “Diesel-RK” software complex. Classifier structure three variants were studied, differing in the set of input parameter vector components: regular, with two inputs (pressure increase degree in a supercharger and exhaust gas temperature before a turbine), expanded, with additional control of turbocharger rotor rotation speed, and proposed, with control of air instantaneous consumption by a diesel instead. Model quality was assessed by cross-validation on five fragments and by classification results for test sample which wasn’t used while training. **Results:** Classification accuracy of testing sample by classifier with input parameter regular set doesn’t exceed 41%. The expansion of being controlled list of parameter on account of inclusion therein of turbocharger rotor rotation speed does not noticeably affect diagnostic system efficiency, increasing diagnostic accuracy only till 43%. At the same time, rotor rotation speed replacement with air instantaneous consumption rises testing sample classification accuracy till 91%. **Practical significance:** The effectiveness of the use of machine learning methods for operative monitoring of diesel GAT technical state at condition of optimization of the list of diesel parameters, controlled by locomotive board diagnostics tools, is confirmed. With the purpose to increase control efficiency it is recommended to include diesel instantaneous air consumption into the list with parallel exclusion from their of a turbocharger rotor rotation frequency.

**Keywords:** Gas-air tract, turbocharger, baffle, supercharger, working process, diesel, diagnosis, technical state, classifier, learning sample, transducer, air consumption.

## References

1. Svechnikov A. A. *Sovershenstvovanie tekhnologii kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya agregatov nadduva teplovoznogo dizelya posle remonta. Kand. Diss* [Improving the technology for monitoring the technical condition of the supercharging units of a diesel locomotive after repair. Cand. Diss]. Samara, 2010. 24 p. (In Russian)

2. Titanakov D. A. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya gazovozdushnogo trakta teplovoznnykh dizeley*. Kand. Diss [Assessment of the technical condition of the gas-air path of diesel locomotives. Cand. Diss]. Omsk, 2005. 20 p. (In Russian)
3. Vasin P. A. *Issledovanie gazovozdushnogo trakta chetyrekhtaktnogo vysokooborotnogo dizelya s turbonadduvom kak ob'ekta avtomaticheskoy bezrazbornoy diagnostiki*. Kand. Diss [Study of the gas-air path of a four-stroke high-speed turbocharged diesel engine as an object of automatic in-place diagnostics. Cand. Diss]. Leningrad, 1984. 23 p. (In Russian)
4. Lobanov I. I. *Povyshenie ekspluatatsionnoy effektivnosti teplovoznnykh dizeley primeneniem sredstv operativnoy diagnostiki*. Kand. Diss [Improving the operational efficiency of diesel engines using operational diagnostics. Cand. Diss]. Moscow, 2017. 23 p. (In Russian)
5. *Kompleks diagnostiki i nastroyki dizeley KDN «MAGISTRAL»: sayt / OOO «Tekhtrans-D»* [Complex for diagnostics and tuning of diesel engines KDN “MAGISTRAL”: site / LLC “Techtrans-D”]. St. Petersburg, 2022. Available at: <https://tehtrans-d.ru> (accessed: April 13, 2022). (In Russian)
6. Kuleshov A. S. *Programma rascheta i optimizatsii dvigateley vnutrennego sgoraniya DIZEL'-RK. Opisanie matematicheskikh modeley, reshenie optimizatsionnykh zadach* [Program for calculation and optimization of internal combustion engines DIESEL-RK. Description of mathematical models, solution of optimization problems]. Moscow, MGTU im. Bauman Publ., 2004. 123 p. (In Russian)
7. Cherezov D. S. *Obzor osnovnykh metodov klassifikatsii i klasterizatsii dannykh* [Overview of the main methods of data classification and clustering]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: system analysis and information technology]. Voronezh, 2009, I. 9, pp. 25-29. (In Russian)
8. Fedotov M. V. *Prediktivnaya analitika tekhnicheskogo sostoyaniya sistem teplovoznnykh s ispol'zovaniem neyrosetevykh prognoznykh modeley* [Predictive analytics of the technical condition of diesel locomotive systems using neural network predictive models]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results]. St. Petersburg, 2021, I. 3, pp. 102-115. (In Russian)
9. *Metod opornykh vektorov dlya standartnoy zadachi klassifikatsii* [Support vector machine for the standard classification problem]. Available at: [www.machinelearning.ru/wiki/images/2/25/SMAIS11\\_SVM.pdf](http://www.machinelearning.ru/wiki/images/2/25/SMAIS11_SVM.pdf) (accessed: April 14, 2022). (In Russian)
10. *Termokomplekt dizel'nyy TKD-50M: sayt/OOO «Neva-Dizel'»* [Thermal set diesel TKD-50M: site / OOO “Neva-Diesel”]. St. Petersburg, 2022. Available at: <http://neva-diesel.com/mkd-50m-termo-dizelnyy-komplekt> (accessed: April 14, 2022). (In Russian)
11. *Vybor metriki v mashinnom obuchenii. Kak vybrat' metriki dlya validatsii rezul'tata Machine Learning* [The choice of metrics in machine learning. How to choose metrics for validating the result of Machine Learning]. Moscow, 2022. Available at: <http://blog.datalytica.ru/2018/05/blog-post.html> (accessed 14 April 2022). (In Russian)
12. Grachev V. V. *Preskriptivnyy kontrol' energoeffektivnosti teplovoza s ispol'zovaniem intellektual'nykh metodov obrabotki izmeritel'noy informatsii* [Prescriptive control of the energy efficiency of a diesel locomotive using intelligent methods for processing measurement information].



St. Petersburg: Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I Publ. 2019. 105 p. (In Russian)

13. *Termoanemometr TTM-04-02Zh sayt OOO «Orbital'»* [Hot-wire anemometer TTM-04-02ZH website of Orbital LLC]. St. Petersburg, 2022. Available at: [http://www.orbitalspb.ru/parametri\\_sredi/termoanemometry/anemometr\\_TTM2-04\\_portativnyi](http://www.orbitalspb.ru/parametri_sredi/termoanemometry/anemometr_TTM2-04_portativnyi) (accessed: April 14, 2022).

Received: April 15, 2022

Accepted: April 28, 2022

**Author's information:**

Vladimir V. GRACHEV — D. Sci. in Engineering, Associate Professor, Professor;  
v\_grach@mail.ru

Mikhail V. FEDOTOV — PhD in Engineering, Laboratory Head; fedotov-mv@vnikti.com

Alexander V. GRIZHSHENKO — D. Sci. in Engineering, Professor; sanklok@mail.ru

Fedor Yu. BAZILEVSKIY — PhD in Engineering, Associate Professor; f\_basilevski@mail.ru

Alexander L. SHARAPOV — 1st Category Engineer-Programmer; sharapov-al@vnikti.com