

На правах рукописи



Авсиевич Владимир Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ
ТЕПЛОВОЗА ПУТЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОДИЗЕЛЯ**

Специальность: 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара
2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» и федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Иващенко Антон Владимирович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Балабин Валентин Николаевич**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы»;

Пляскин Артем Константинович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», доцент кафедры «Транспорт железных дорог».

Ведущая организация: акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)

Защита состоится «28» декабря 2021 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 44.2.006.01 (Д 218.011.02) на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения» по адресу: 443066, г. Самара, ул. Свободы 2В, ауд. 5216.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <https://www.samgups.ru>.

Автореферат разослан «17» ноября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Исайчева Алевтина Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и степень ее разработанности. В современных условиях эксплуатации к силовым установкам автономных локомотивов предъявляются повышенные требования. В составе силовых установок тепловозов в России и за рубежом широко используются дизельные двигатели внутреннего сгорания. Для улучшения их технико-эксплуатационных характеристик производится переоборудование для работы на газе, при этом модернизация силовой установки требует существенных изменений штатной системы питания.

Основная сложность перехода дизельного двигателя на газ связана со способом воспламенения горючего в камере сгорания. Этот процесс в дизельных двигателях происходит за счет высокого давления топливно-воздушной смеси, однако, сильное сжатие газа не создает условия для его горения. В связи с этим, воспламенение топливной смеси производится с помощью небольшой запальной дозы дизельного топлива.

Проблемами управления подачи топлива в двигатели, работающие на смеси дизельного топлива и природного газа, занимаются научные коллективы ВНИИЖТ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЮУрГУ, ОмГУПС, РУДН, МАДИ, ТГУ, СамГУПС. В частности, эти вопросы нашли отражение в трудах Е.Е. Коссова, В.В. Фурмана, В.А. Маркова, И.К. Андрончева, А.И. Володина, А.Н. Головаша, А.В. Грищенко, Е.Б. Демченко, В.Н. Игина, В.П. Казанцева, В.В. Кручека, Л.А. Мугинштейна, В.М. Овчинникова, А.Т. Осяева, С.А. Пожидаева, А.Э. Симсона, А.П. Третьякова, Г.А. Фофанова, А.З. Хомича, Н.Г. Швец, С.М. Овчаренко, В.А. Четвергова, Е.С. Павловича, В. Д. Кузьмич, В. И. Киселева, А.М. Евстафьева, Е.И. Сковородникова, А.П. Шайкина, В.А. Шишкова, Д.Я. Носырева, А.Д. Рослякова, Ю.И. Булыгина, Andreassi L., Dietrich W.R., Golub A.. Подача газообразного топлива в камеру сгорания осуществляется дозировано, для чего дополнительно устанавливается электрогазовый клапан. Расчет дозы газообразного топлива производится в электронном блоке управления на базе микроконтроллера и датчиков, контролирующей работу двигателя. Существующие автоматические системы управления подачей топлива основаны на реализации пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора.

Недостатком реализации ПИД регулятора является невозможность сокращения времени переходного процесса без перерегулирования при переходе от одного нагрузочно-скоростного режима к другому. Для решения этой проблемы в диссертации предлагается применять дробный $PI_{\alpha}D_{\beta}$ алгоритм управления частотой вращения коленчатого вала, который в отличие от классического ПИД регулятора, при определении текущего воздействия позволяет оценивать разный вклад составляющих с учетом предыстории. Кроме этого, существующие системы управления не учитывают закоксованность выпускных окон, что также приводит к повышенному расходу топлива. Указанный недостаток связан с отсутствием технологий прямой диагностики этого параметра. Предлагается реализовать методику косвенной диагностики

закоксованности выпускных окон с помощью контроля и анализа нескольких параметров таких как: расхода топлива, поступления воздуха и колебания температуры выхлопных газов для корректировки параметров системы управления. Максимальное снижение расходов на топливо достигается при высоком проценте замещения дизельного топлива газом, который, в свою очередь определяется системой управления подачей газа и высокоточным ограничением запальной дозы дизельного топлива. Таким образом, актуальной является задача повышения экономичности силовой установки тепловоза путем совершенствования системы управления газодизеля.

Диссертационная работа выполнялась в рамках проекта СамГТУ и госбюджетной НИР СамГУПС: проект СамГТУ по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение № 075-15-2019-1364 «Разработка роботизированной системы сельскохозяйственных автомобилей на базе семейства автомобилей КАМАЗ с автономным и дистанционным режимом управления». Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57718X0286; госбюджетная НИР СамГУПС на тему «Нормативно-правовое регулирование и технические основы применения газомоторного топлива на транспорте» Регистрационный номер 121031700033-5 от 17 марта 2021 г. Получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2008634227 на разработку «Блок дробного ПИД регулирования» // А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич. – Москва: опубли. 4.09.2008.

Целью диссертационной работы является снижение расхода топлива газодизеля силовой установки тепловоза при сокращении времени переходного процесса путем совершенствования цифровой системы автоматизации управления с помощью реализации дробного ПИ_αД_β управления частотой вращения коленчатого вала и разработка алгоритма диагностики закоксованности выпускных окон.

Для достижения цели работы были решены следующие задачи:

1. Анализ и исследование особенностей реализации систем управления газодизельных двигателей силовых установок тепловозов.

2. Разработка цифрового алгоритма дробного пропорционально-интегрально-дифференциального управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза.

3. Совершенствование системы автоматизации управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза за счет реализации устройства диагностики закоксованности выпускных окон.

4. Разработка структуры системы автоматизации управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза.

5. Проведение исследования цифровой системы автоматизации управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза.

Объектом исследования является силовая установка тепловоза, оснащенная газодизельным двигателем.

Предметом исследования является система автоматизации управления газодизельным двигателем тепловоза.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Разработан цифровой рекуррентный алгоритм дробного пропорционально-интегрально-дифференциального управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза, отличающийся дополнительными настроечными коэффициентами, реализация которого позволяет, в отличие от классических ПИД регуляторов, не допустить увеличения выброса частоты вращения коленчатого вала над целевым значением (перерегулирования) при сокращении времени переходного процесса.

2. Для системы автоматизации управления двигателем силовой установки тепловоза адаптированы частотные критерии устойчивости Михайлова и Найквиста, в результате чего впервые получена возможность производить анализ устойчивости дробных систем управления без определения корней характеристических уравнений.

3. Разработана структура системы автоматизации управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза, что позволило реализовать управление подачей топлива на основе дробного $\text{ПИ}_\alpha\text{Д}_\beta$ алгоритма управления и результатов диагностики закоксованности выпускных окон, и обеспечить тем самым преимущество по технико-эксплуатационным показателям надежности и экономичности.

4. Разработана имитационная модель управления газодизельного двигателя силовой установки тепловоза, позволяющая осуществлять моделирование переходных процессов поддержания частоты вращения коленчатого вала газодизельного двигателя. Отличие модели от существующей заключается в возможности проведения исследований с различными ПИД алгоритмами управления, что позволяет проводить анализ данных с разными алгоритмами управления.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в обосновании дробного $\text{ПИ}_\alpha\text{Д}_\beta$ регулятора газодизельной генераторной установки тепловоза, позволяющей снизить расход топлива при повышении маневренности и надежности за счет сокращения времени переходного процесса. Реализация цифровой системы автоматизированного управления газодизельным двигателем тепловоза, а также устройства корректировки ее параметров на основе диагностики закоксованности выпускных окон позволило усовершенствовать систему автоматического управления подачей смесового топлива газодизельных двигателей тепловозов.

Методы исследования. Поставленная в работе цель достигается с использованием методов современной теории управления, дифференциального и интегрального исчисления, цифровой обработки сигналов, математического и имитационного моделирования.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Цифровой рекуррентный алгоритм дробного пропорционально-интегрально-дифференциального управления, обеспечивающий, в отличие от классических ПИД регуляторов, сниженный выброс частоты вращения коленчатого вала над целевым значением при сокращении времени переходного процесса.

2. Устройство корректировки параметров системы управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза с учетом закоксованности выпускных окон, позволяющее, в отличие от аналогов, производить диагностику закоксованности по косвенным признакам (расход топлива, воздуха, температура выхлопных газов).

3. Структура цифровой системы автоматизации управления газодизельным двигателем тепловоза, позволяющая реализовать управление подачей топлива на основе дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ алгоритма управления и результатов диагностики закоксованности выпускных окон.

4. Результаты исследования цифровой системы управления газодизельным двигателем тепловоза, реализующей дробный ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятор, в ходе имитационного моделирования и на базе лабораторного стенда, показавшего преимущество по расходу топлива при повышении маневренности и надежности.

Достоверность научных положений работы подтверждена сравнением результатов моделирования и экспериментальных исследований. Исследования в реальных эксплуатационных условиях проводились для газодизеля модели Д50 (6 ЧН 31,8/33) маневрового тепловоза.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах: на 13 международной конференции «Математика. Экономика. Образование» (Дубна, 2006); на 63 научно-технической конференции «Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука» (Самара, 2006); на 3 и 4 международных конференциях по проблемам управления (Москва, 2006, 2009); на 4 международной конференции «Идентификация систем и задач управления SICPRO '07» (Москва, 2007), 34 научной конференции студентов и аспирантов «Дни студенческой науки» (Самара, 2007), 3 Всероссийской научно-практической конференции «Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте» (Самара, 2020).

Реализация результатов исследования. Полученные результаты используются в ООО «ППП Дизельавтоматика», в научно-исследовательской межотраслевой лаборатории «Газомоторное и водородное топливо» кафедры «Локомотивы» Самарского государственного университета путей сообщения в виде действующей лабораторной установки, а также внедрены в учебный процесс Самарского государственного технического университета и Самарского государственного университета путей сообщения.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 8 научных работ, из них: 3 публикации в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2

публикации в издании Scopus, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все результаты, определяющие научную новизну и выносимые на защиту, получены лично автором.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 169 наименований и 1 приложения. Объем работы: 169 страниц основного текста, включающего 32 рисунка, 14 таблиц и 1 страница приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи исследования, характеризуется научная новизна полученных результатов, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описывается принцип работы системы автоматизированного управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза в зависимости от подачи газа и запальной дозы дизельного топлива, проведен анализ и исследование особенностей реализации системы управления силовыми установками тепловозов, работающих на смеси дизельного топлива и природного газа.

Совершенствование существующих и создание новых газодизельных конструкций связаны с разработкой и внедрением современной системы автоматизации управления (рисунок 1), которая обеспечивает формирование запальной дозы дизельного топлива, формирование доз газообразного топлива, а также автоматический переход в дизельный режим во внештатных условиях.

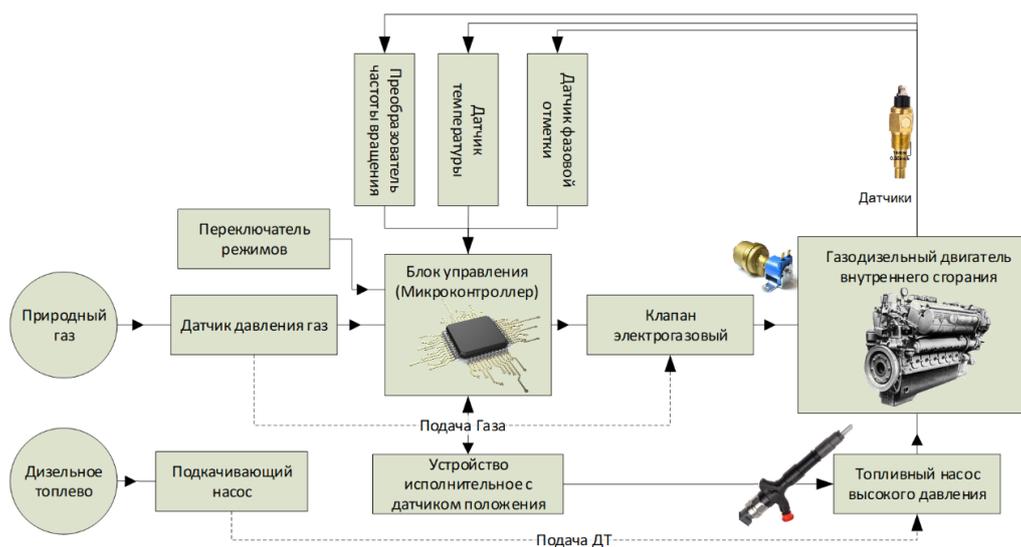


Рисунок 1 – Аппаратура и система автоматизации управления газодизелем силовой установки тепловоза

Анализ систем автоматического управления выявил, что в настоящее время наилучшее качество автоматического регулирования частоты обеспечивает микропроцессорная система, в которой в качестве алгоритма

управления используется классический ПИД регулятор или его модификации. Известным недостатком ПИД регулятора является отрицательное влияние дифференцирования, которое состоит в излишнем увеличении участка амплитудно-частотной характеристики контура, в котором фазовый сдвиг уже настолько велик, что дифференцирование не исправляет ситуацию, что характерно для объектов с запаздыванием. В результате сокращение времени переходного процесса приводит к увеличению выброса частоты вращения коленчатого вала над целевым значением.

Таким образом, перспективной является модернизация силовой установки тепловоза путем реализации новой системы автоматизации управления газодизеля.

Во второй главе предложена модернизированная структура системы автоматизации управления газодизеля силовой установки тепловоза.

В работе рассматривается и модернизируется автоматическая система топливоподачи газодизеля СУДМ.03, разработанная ООО «ППП Дизельавтоматика». В автоматическую систему управления топливоподачи двигателя добавлены дополнительно (рисунок 2): датчик расхода воздуха; датчик температуры выпускных газов; блок диагностики закоксованности выпускных окон; блок формирования корректирующего сигнала работы двигателя.

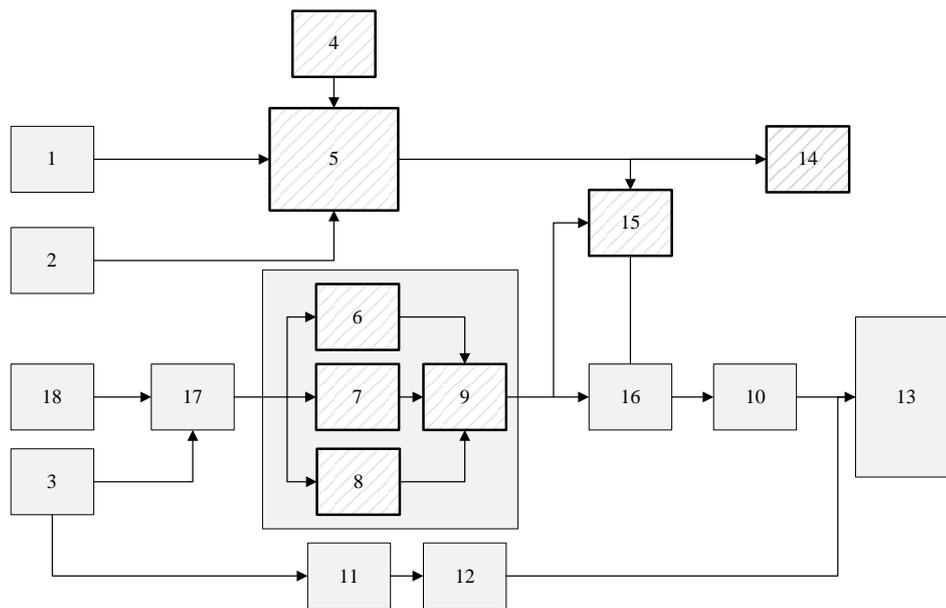


Рисунок 2 – Схема цифрового управления газодизеля силовой установки тепловоза:

1, 2 – датчики расхода топлива и воздуха, 3 – датчик частоты вращения, 4 – датчик температуры выпускных газов, 5 – блок диагностики закоксованности выпускных окон, 6 – блок пропорционального звена, 7 – блок дробного интегрального звена, 8 – блок дробного дифференциального звена, 9, 16, 17 – сумматоры, 10 – электрогазовый клапан, 11 – блок формирования запальной дозы, 12 – ТНВД, 13 – двигатель внутреннего сгорания, 14 – индикатор аварийного режима, 15 – блок формирования корректирующего сигнала, 18 – уставка

Введем следующие обозначения:

$w(t)$ – частота вращения коленчатого вала в момент времени t , об./мин;

w^* – целевое значение частоты вращения коленчатого вала, об./мин;
 w^{max} – максимальное значение частоты вращения коленчатого вала, об./мин;
 $e(t) = \frac{w^* - w(t)}{w^{max}} \cdot 100\%$ – величина рассогласования, %;
 $u(t)$ – управляющее воздействие, %;
 $V^{DT}(t) = \text{const}$ – доля дизельного топлива, л;
 $V^G(t) = K_G \cdot u(t)$ – доля газа с учетом условий эксплуатации двигателя, м³.

Решить данную проблему можно путем цифровой реализации дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятора:

$$u(t) = K_{\Pi} e(t) + \frac{1}{T_{\Pi}^{\alpha}} I_{0t}^{\alpha}(e(t)) + T_{\text{Д}}^{\beta} D_{0t}^{\beta}(e(t)), \quad (1)$$

где K_{Π} – пропорциональный коэффициент (коэффициент усиления), T_{Π} – постоянная интегрирования, $T_{\text{Д}}$ – постоянная дифференцирования, t – время, интеграл и дифференциал дробного порядка Римана-Ливиулла:

$$I_{0t}^{\alpha}(e(t)) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^t \frac{e(\tau)}{(t-\tau)^{1-\alpha}} d\tau, \quad (2)$$

$$D_{0t}^{\beta}(e(t)) = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{e(\tau) d\tau}{(t-\tau)^{\beta-1}}, \quad (3)$$

где α, β – дробные показатели интеграла и дифференциала соответственно $0 < \alpha, \beta < 1$, t – время, $\Gamma()$ – гамма-функция.

Это известный регулятор, описанный авторами Podlubny I., В.А. Жмудь, и др., который ранее не использовался в силу избыточной и неоправданной сложности неполного интегрирования и дифференцирования в системе управления. Однако для современных цифровых микроконтроллеров данная проблема несущественна.

Для использования в вычислительных системах управления применим цифровой аналог выражения (1), где расчет и формирование управляющего воздействия u_n , % рассчитывается по формуле:

$$u_n = K_{\Pi} e_n + \frac{T_c^{\alpha}}{\Gamma(\alpha)} \sum_{i=1}^n i^{\alpha-1} e_{n-i} + \frac{T_c^{\beta}}{T_c^{\beta}} (e_n - e_{n-1}), \quad (4)$$

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция.

На практике вместо вычислений абсолютных значений управляющего сигнала удобнее вычислять его приращения Δu_n на каждом такте:

$$u_n = u_{n-1} + \Delta u_n, \quad (5)$$

где n – шаг алгоритма.

В отличие от классического ПИД регулятора, в котором на величину интегрирующей составляющей влияет изначальное отклонение контролируемой величины, а дифференцирующая составляющая пропорциональна темпу изменения отклонения, в дробном ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регуляторе при определении текущего воздействия оценивается разный вклад составляющих с учетом предыстории.

В третьей главе предложен цифровой рекуррентный алгоритм дробного пропорционально-интегрально-дифференциального управления. Для обоснования алгоритма проведено обобщение частотных критериев устойчивости для системы дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ управления газодизельным

двигателем тепловоза, построена и исследована имитационная модель системы управления газодизельным двигателем силовой установки.

Предлагаемый алгоритм управления обобщенно представлен в виде следующей последовательности шагов:

1. Задание настроечных коэффициентов:

- K_{Π} – пропорциональный коэффициент (коэффициент усиления);
- $T_{\text{д}}^{\beta}$, с – постоянная дифференцирования;
- $T_{\text{и}}^{\alpha}$, с – постоянная интегрирования;
- α, β – дробные показатели интеграла и дифференциала соответственно;
- $T_{\text{с}}, T_{\text{с}}^{\alpha}, T_{\text{с}}^{\beta}$, с - шаги квантования (10 % от максимального времени открытия клапана).

2. Сбор информации с датчика оборотов коленчатого вала, датчика температуры, датчика фазового сдвига, датчика массового расхода воздуха и топлива, датчика температуры выхлопных газов.

3. Задание целевого значения частоты вращения коленчатого вала w^* , об./мин, с помощью переключателя режимов работы.

4. Расчет величины рассогласования $e_n = \frac{w^* - w(t)}{w^{\text{max}}} \cdot 100\%$, в %, где w^{max} , об./мин – максимальное значение частоты вращения коленчатого вала; $w(t)$, об./мин – частота вращения коленчатого вала в момент времени t .

5. Проверка закоксованности выпускных окон и формирование корректирующего сигнала на основе информации о расходе воздуха, топлива и температуре выпускного коллектора (алгоритм диагностики закоксованности выпускных окон приведен в 4 главе).

6. Если выпускные окна закоксованы, то подается сигнал на индикатор аварийного режима и формируется корректирующий сигнал для формирования управляющего воздействия, иначе корректирующий сигнал не формируется.

7. Расчет и формирование управляющего воздействия u_n , % с учетом корректирующего сигнала закоксованности выпускных окон по формуле:

$$u_n = u_{n-1} + q_0 e_n + q_1 e_{n-1} + q_2 e_{n-2} + \varepsilon_n, \quad (6)$$

$$\text{где } q_0 = K_{\Pi} + \frac{T_{\text{д}}}{T_0^{\beta}}; \quad q_1 = -K_{\Pi} - 2 \frac{T_{\text{д}}}{T_0^{\beta}} + \frac{T_0^{\alpha}}{T_{\text{и}} \Gamma(\alpha)}; \quad q_2 = \frac{T_{\text{д}}}{T_0^{\beta}} + \frac{T_0^{\alpha}}{T_{\text{и}} \Gamma(\alpha)} (2^{\alpha-1} - 1);$$

$$\varepsilon_n = \frac{T_{\text{с}}^{\alpha}}{T_{\text{и}} \Gamma(\alpha)} - \text{уточняющий коэффициент.}$$

8. Формирование импульса ШИМ длиной

$$t_{\text{ди}} = \frac{\Delta u \cdot \Delta t}{100\%}, \text{ с,} \quad (7)$$

где Δt - период ШИМ, в соответствии с положением фазового датчика.

9. Подача сигнала на открытие газового клапана текущего цилиндра двигателя внутреннего сгорания.

10. Возврат к пункту два.

Для проведения исследования были получены передаточные функции объекта и проведен их анализ на устойчивость с помощью модифицированных критериев Найквиста и Михайлова.

В четвертой главе впервые предложено устройство диагностики закоксованности выпускных окон по косвенным признакам: расхода топлива, воздуха и температуры выхлопных газов для корректировки параметров системы управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза.

При большом проценте закоксованности выпускных окон происходит перелив топлива и нехватка воздуха. В результате полученная смесь догорает в выпускных окнах, из-за чего возрастает вероятность возгорания тепловоза. Для повышения безопасности и экономичности системы управления газодизельным тепловоза разработан дополнительный блок диагностики закоксованности выпускных окон по косвенным признакам расхода топлива, воздуха и температуры выхлопных газов (рисунок 3). С помощью этого блока реализуется проверка ограничений, которые можно описать с помощью системы неравенств следующего вида:

$$\begin{cases} a_1x_1 + a_2x_2 + a_4 < D_3 \\ b_1x_1 + b_3x_3 + b_4 < D_3 \\ c_2x_2 + c_3x_3 + c_4 < D_3 \end{cases} \quad (8)$$

где $a_1, a_2, a_4, b_1, b_3, b_4, c_2, c_3, c_4$ – настроечные коэффициенты блока диагностики, которые необходимо подбирать в зависимости от марки двигателя, D_3 – значение закоксованности.

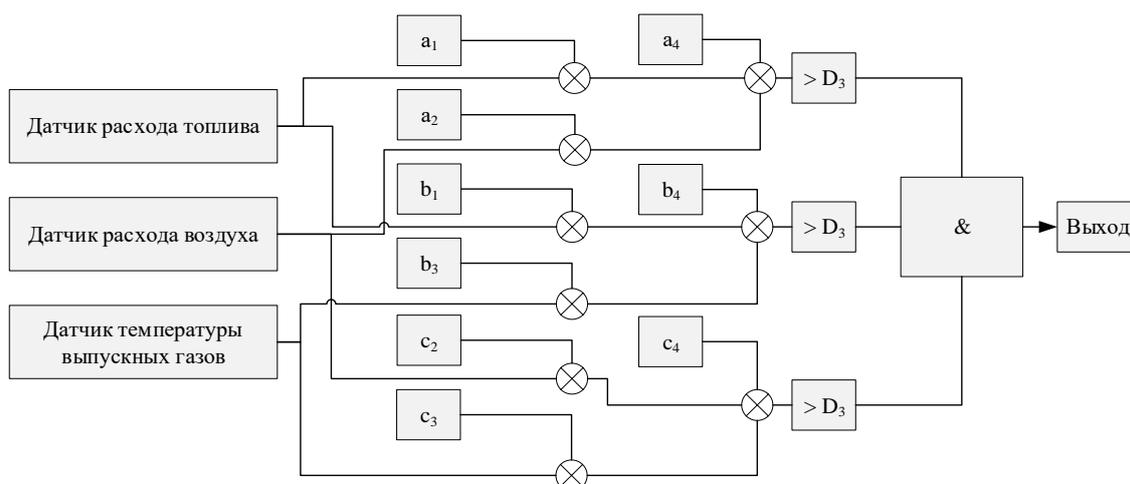


Рисунок 3 – Схема блока диагностики закоксованности выпускных окон, & – блок логического сравнения «И», \otimes – сумматор

При достижении максимальных предельных значений формируется сообщение об ошибке в блок формирования корректирующего сигнала работы газодизельного двигателя. Корректирующий сигнал ограничивает максимальную подачу топлива и тем самым уменьшает мощность двигателя, что дает возможность избежать поломки двигателя и его возгорания из-за высокой температуры выхлопных газов.

В ходе исследования устройства в составе системы автоматизированного управления подачи смесового топлива на базе газодизельной установки выявлено, что при закоксованности окон на 15 % блок диагностики срабатывает на низких оборотах и не срабатывает на высоких оборотах; при закоксованности окон на 20 % блок диагностики успешно срабатывает на всех режимах работы двигателя.

В пятой главе проведено исследование модернизированной цифровой системы автоматизированного управления газодизельным двигателем в ходе имитационного моделирования и на базе лабораторного стенда двигателя газодизельной установки Д-242, оборудованной автоматической системой управления топливоподачи газодизеля СУДМ.03 от компаний ООО «ППП Дизельавтоматика».

По экспериментальным данным определена модель двигателя в форме передаточных функций при работе на разных частотах с помощью инструментария System Identification программного обеспечения Matlab. Предложенный алгоритм вычисления управляющего воздействия реализован в виде S-функции (Piddd). Далее разработана модель газодизельной установки в имитационной среде Simulink Matlab (рисунок 4). Модель позволяет одновременно проводить эксперименты с классическим ПИД и дробным ПИ_αД_β регуляторами синхронно.

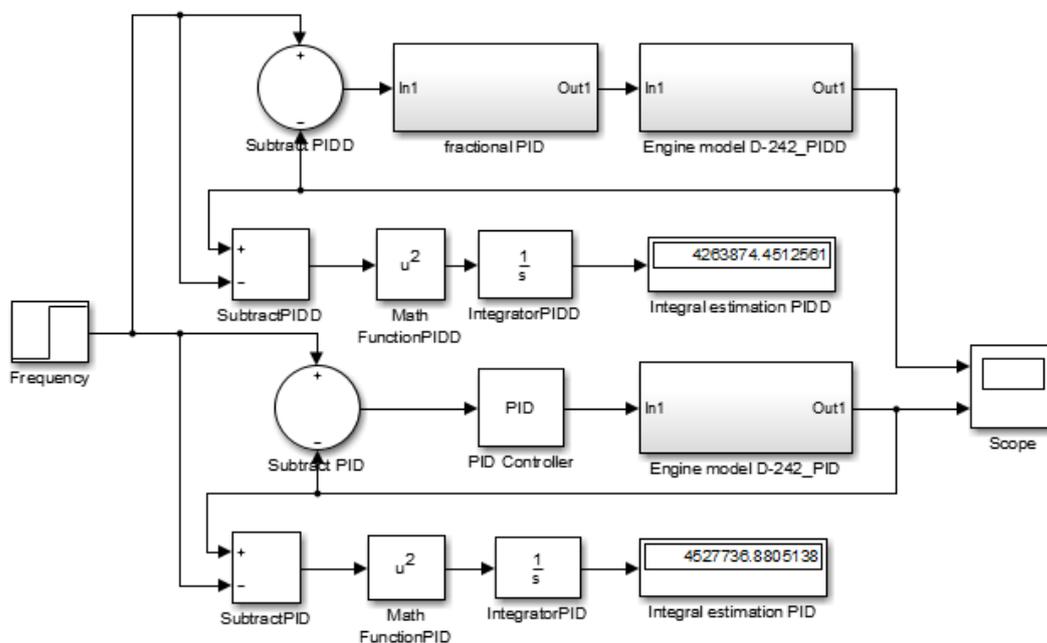
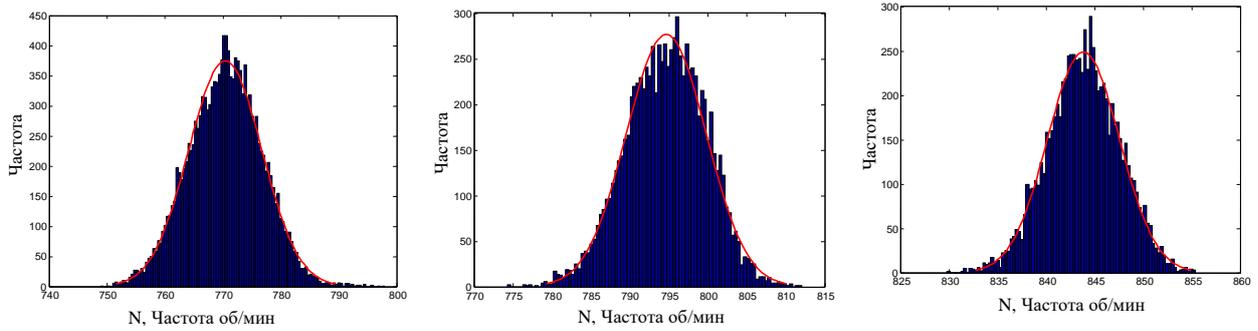


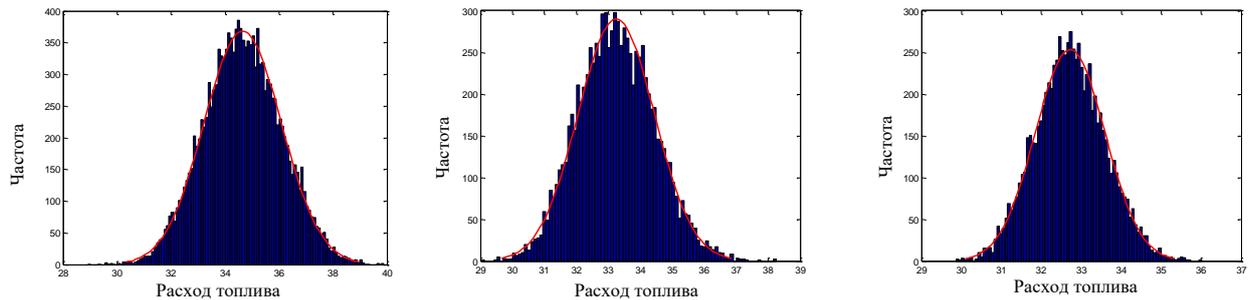
Рисунок 4 – Модель для исследования двигателя Д-242с дробным ПИ_αД_β и классическим ПИД регуляторами

На основании проведенного исследования (рисунки 5 и 6) сделан вывод о том, что полученные данные соответствуют нормальному распределению, а статические характеристики дисперсии, размаха выборки, среднеквадратичного отклонения с увеличением частоты – уменьшаются, что соответствует стабильной работе двигателя. С увеличением количества оборотов двигателя средний расход топлива уменьшается на 16 % на высоких оборотах двигателя по сравнению с оборотами на холостом ходу. Также с повышением оборотов уменьшается диапазон колебания топливной рейки для поддержания частоты оборотов на 63 %.



- А) $Y=770$, $m=770,4$, $d=39,8$, $\sigma=6,3$, $r=49$ Б) $Y=794$, $m=794,7$, $d=26,4$, $\sigma=5,1$, $r=37,8$ В) $Y=843$, $m=843,9$, $d=13,7$, $\sigma=3,7$, $r=25,6$

Рисунок 5 - Гистограмма частоты вращения коленчатого вала



- А) $Y=770$, $m=34,7$, $d=2,1$, $\sigma=1,4$, $r=10,9$ Б) $Y=794$, $m=34,2$, $d=1,4$, $\sigma=1,2$, $r=9,2$ В) $Y=843$, $m=32,7$, $d=0,8$, $\sigma=0,9$, $r=25,6$

Рисунок 6 – Гистограмма расхода топлива: d – дисперсия, r – размах выборки, σ – среднее квадратичное отклонение, m – математическое ожидание, Y – уставка

Путем моделирования получены оптимальные настройки ПИД алгоритма управления и дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ алгоритма управления (рисунок 7). Выявлено преимущество по выбросу частоты вращения коленчатого вала над целевым значением на 45,5 %, времени переходного процесса на 33,3 %, интегральной оценке качества на 6,8 % по сравнению с классическим ПИД регулятором.

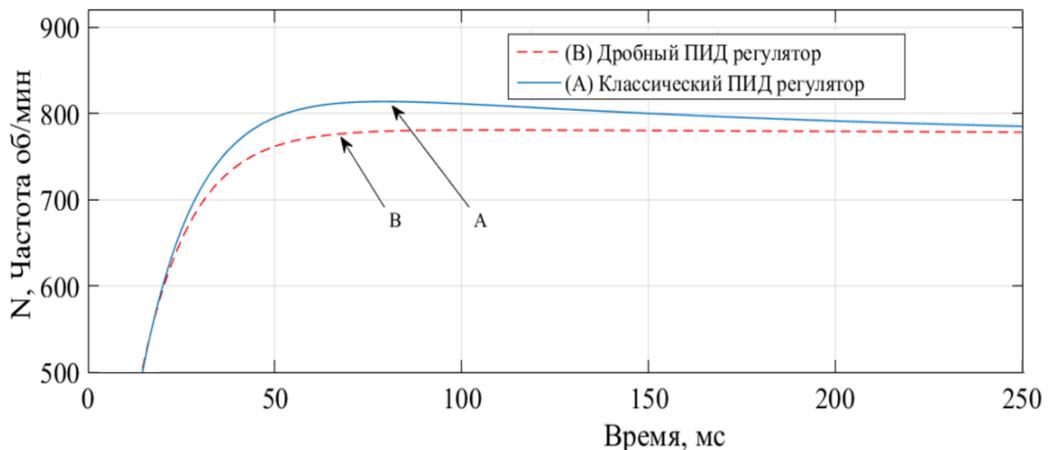


Рисунок 7 – Результаты моделирования ПИД (А) и ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ (В) алгоритмов управления при частоте 770 об/мин

Проведено также исследование работы дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регулятора в составе автоматической системы управления на базе лабораторного стенда.

Экспериментальные данные (рисунок 8) получены на одинаковом промежутке времени от $t = 0$ до $t = 3,5 \cdot 10^5$ мс с изменением задания частоты вращения коленчатого вала с интервалом времени 10 с.

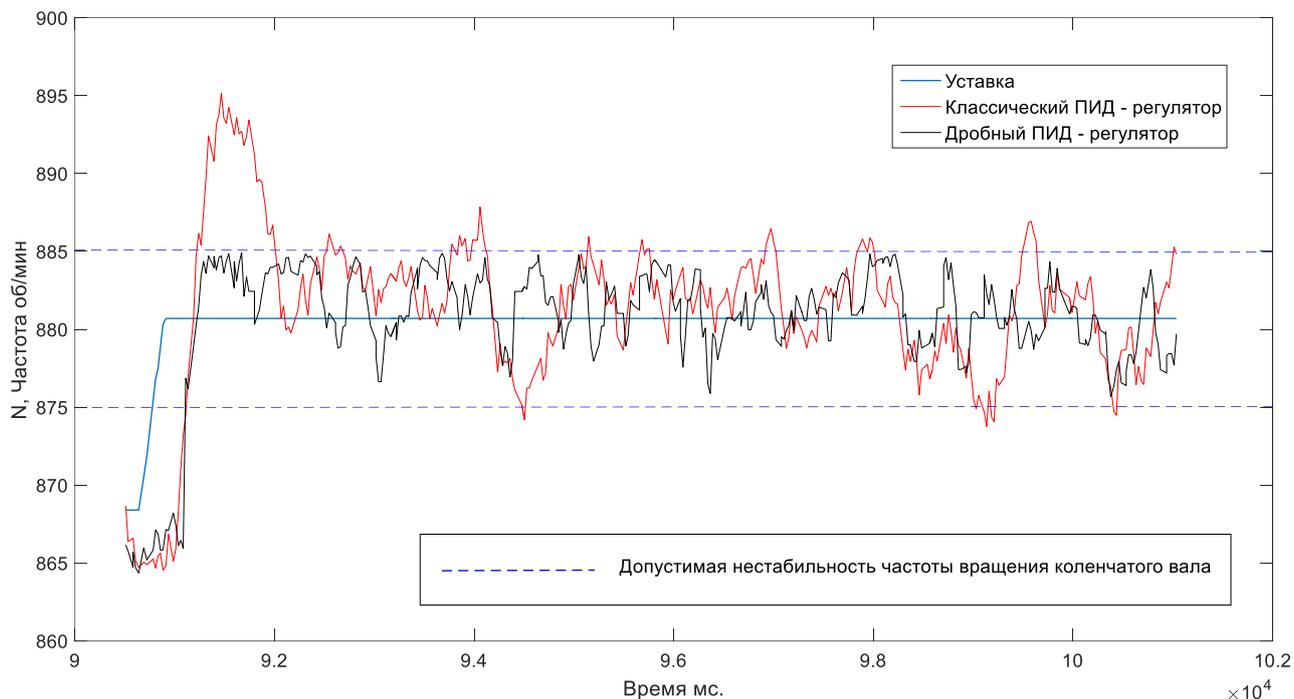


Рисунок 8 – Результаты исследования ПИД и ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ регуляторов

Для обработки результатов эксперимента использовалось программное обеспечение, входящее в состав лабораторной установки. Результаты сравнительного анализа алгоритмов ПИД и дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ управления приведены в таблице 1. Видно, что применение дробного ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$ управления обеспечивает экономию топлива Q в размере 7,02 %, при этом выброс частоты вращения коленчатого вала над целевым значением меньше на 59,1 %, а время переходного процесса меньше на (t_p , с) – 7 %.

Таблица 1 – Результаты исследования

	K_P	T_I	T_D	α	β	$\Delta w, \%$	t_p, c	$Q, м3/ч$
ПИД	2	0,01	0,005	–	–	8,3	2,46	0.0057
ПИ $_{\alpha}$ Д $_{\beta}$	2	0,01	0,005	0,43	0,68	3,4	2,31	0.0053

Проведенные расчеты показали, что при реализации предложенной системы управления двигателями силовых установки тепловозов, работающих на смесевом топливе, годовой экономический эффект на один тепловоз, составит 25200 рублей. Согласно инвентаризации в парке ОАО «РЖД» содержится 536 пассажирских тепловозов, 3750 грузовых тепловозов и 5989 маневровых тепловозов. В результате ожидаемая экономия от предлагаемой модернизации системы управления составляет 258 930 000 рублей в год.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. Исследованы особенности реализации систем управления двигателями силовых установок тепловозов, работающих на смеси дизельного топлива и природного газа. Для элементов и устройств систем управления, описываемых дифференциальными уравнениями дробного порядка, адаптированы частотные критерии устойчивости Михайлова и Найквиста, в результате чего впервые получена возможность производить анализ устойчивости дробных систем управления без нахождения корней характеристических уравнений.

2. Разработан цифровой рекуррентный алгоритм дробного пропорционально-интегрально-дифференциального управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза, отличающийся дополнительными настроечными коэффициентами, реализация которого позволяет, в отличие от классических ПИД регуляторов, не допустить увеличения выброса частоты вращения коленчатого вала над целевым значением при сокращении времени переходного процесса.

3. Впервые предложено устройство диагностики закоксованности выпускных окон более 20 % по косвенным признакам расхода топлива, поступления воздуха и колебания температуры выхлопных газов для корректировки параметров системы управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза.

4. Разработана структура системы автоматизации управления газодизельным двигателем внутреннего сгорания силовой установки тепловоза, что позволило реализовать управление подачей топлива на основе дробного ПИ_αД_β алгоритма управления и результатов диагностики закоксованности выпускных окон, и обеспечить тем самым преимущество по технико-эксплуатационным показателям надежности и экономичности.

5. Результаты исследования цифровой системы автоматизации управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза, реализующей алгоритм дробного ПИ_αД_β управления, в ходе имитационного моделирования показали в среднем преимущество по выбросу частоты вращения коленчатого вала над целевым значением на 45, 5%, времени переходного процесса на 33,3 %, интегральной оценке качества на 6,8 % по сравнению с классическим ПИД регулятором. Испытания на базе лабораторного стенда показали, что при использовании классического ПИД регулятора расход топлива составил 0.0057 м³/ч, а при использовании дробного ПИ_αД_β регулятора 0.0053 м³/ч, что дает экономию топлива до 7,02 % при повышении маневренности и надежности.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ НАУЧНЫХ РАБОТАХ:

Научные статьи, опубликованные в журналах, рекомендуемых ВАК:

1. Авсиевич, В. В. Разработка рекуррентных алгоритмов управления газодизельным двигателем силовой установки магистрального тепловоза / А.В. Авсиевич, А.В. Иващенко, В.В. Авсиевич // Вестник транспорта Поволжья, – № 3 (87). – Самара, 2021. – С. 12-21.
2. Авсиевич, В. В. Разработка имитационной модели управления газодизельным двигателем силовой установки тепловоза / В.В. Авсиевич // Вестник транспорта Поволжья, – № 4 (88). – Самара, 2021. – С. 7-14.
3. Авсиевич, В. В. Усовершенствование цифровой системы управления газодизелем силовой установки тепловоза / А.В. Авсиевич, А.В. Иващенко, В.В. Авсиевич // Вестник транспорта Поволжья, – № 4 (88). – Самара, 2021. – С. 24-31.

Научные статьи, опубликованные в журналах, входящих в Scopus:

4. Avsievich, V. Fractional control system simulation to modernize a locomotive dual-fuel engine / A. Ivaschenko, V. Avsievich, A. Avsievich // Modelling and Simulation 2020 - The European Simulation and Modelling Conference, ESM 2020 : 34, Toulouse, 21–23 октября 2020 года. – Toulouse, 2020. – P. 242-244.
5. Avsievich, V. Fractional Controlling System of an Autonomous Locomotive Multifuel Engine / A. Ivaschenko, V. Avsievich, A. Avsievich // Proceedings - 2020 IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems, ICPS 2020 : 3, Virtual, Tampere, 10–12 июня 2020 года. – Virtual, Tampere, 2020. – P. 425-428.

Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ

6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2008634227 на разработку «Блок дробного ПИД регулирования» // А.В. Авсиевич, В.В. Авсиевич. – Москва: опубл. 4.09.2008.

Публикации в других изданиях:

7. Авсиевич, В. В. Алгоритмы дробного ПИД - управления в транспортных установках на газомоторном топливе / А. В. Авсиевич, В. В. Авсиевич // Наука и образование транспорту. – 2019. – № S1. – С. 2-7.
8. Авсиевич, В.В. Получение математической модели газодизельной установки на базе двигателя внутреннего сгорания Д-242 / Н. В. Чертыковцева, В. В. Авсиевич, Т. Р. Реуф, М. В. Ткачев // Мехатроника, автоматизация и управление на транспорте : Материалы II Всероссийской научно-практической конференции, Самара, 26–27 марта 2020 года / Самарский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 88-90.

АВСИЕВИЧ Владимир Викторович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ
ТЕПЛОВОЗА ПУТЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОДИЗЕЛЯ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов
и электрификация (технические науки)

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 09.11.2021. Формат 60x90 1/16.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 131.

Отпечатанной в Самарском государственном университете путей сообщения.
443022, Самара, Заводское шоссе, 18.
Тел.: (846) 255-68-36.