

05.13.07
0356
V

**ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА**

На правах рукописи

ФЕДЯЕВ Василий Леонидович

УДК 621.436.001.45:681.51

**ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ
ТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**05.13.07 - Автоматизация технологических процессов и
производств (промышленность)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук профессор
В.С. Жабреев.

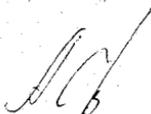
Официальные оппоненты: доктор технических наук профессор
Р.Х. Гафиятуллин,
кандидат технических наук
В.А. Редер.

Ведущее предприятие - Научно-производственное объединение
по тракторостроению НПО "НАТИ" (г. Москва).

Защита диссертации состоится 28 января 1987 года на заседании специализированного совета К 06.13.04 Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола (454044, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76).

Автореферат разослан ".19." декабря 1986г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук
профессор



А.П. Сибрин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Директивами XXVI и XXVII съездов КПСС предусмотрено ускорение разработки, испытаний и постановки на производство новых конструкций тракторов и их агрегатов, не уступающим по своим технико-экономическим показателям лучшим образцам зарубежной техники. При разработке мощных форсированных дизелей резко возрастает время на доводку двигателей (5-7 лет), вследствие большого объема полевых испытаний по определению показателей эксплуатационной надежности. Для сокращения сроков испытаний широко используются методики ускоренных испытаний, требующие разработки специальных автоматизированных стендов с нагрузочными устройствами, способными обеспечить длительные циклические испытания дизелей в переходных режимах. Настоящая работа выполнялась по отраслевому плану МТ и СХМ, связанным с целевой комплексной программой 72.62.81-509480/01.027.03 "Автоматизация исследований и проектирования тракторов".

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ. Основной целью работы является разработка и внедрение исполнительных систем регулирования автоматизированных стендов для испытания тракторных дизелей в переходных режимах, отработки методик ускоренных испытаний двигателей. В соответствии с поставленной целью основными задачами, решаемыми в диссертации являлись следующие:

1. Выбор и уточнение математических моделей нагрузочных устройств при наличии помех с учетом дискретности преобразователей.
2. Синтез квазиоптимальных систем оценки и регулирования нагрузочных параметров (уравнения и структурные схемы).
3. Внедрение исполнительных систем регулирования на автоматизированных стендах для испытаний тракторных дизелей в переходных режимах, отработки методик ускоренных испытаний.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ. Стенды для ускоренных испытаний тракторных двигателей на основе машин постоянного тока (динамометров) с нелинейными тиристорными преобразователями ТИ в цепи управления и электрогидравлическими исполнительными устройствами с индуктивными датчиками положения при наличии помех.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И АППАРАТУРА. Марковская теория нелинейной фильтрации, базирующаяся на методе пространства состояний и теории случайных процессов, теория модального управления для дискрет-

но-непрерывных систем; векторно-матричный анализ; методы натуральных и полунатурных испытаний систем автоматического регулирования. Для расчетов и цифрового моделирования применялись ЭВМ серии ЕС, СМ. Экспериментальные исследования проводились на испытательных стендах НАТИ, ЦФ НАТИ, Урал НИИС НАТИ. При записи и обработке измерений использовались магнитографы БММ-140 (ЧССР) и ТБАС (Япония).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫЕ К ЗАЩИТЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ. Осуществлено преобразование уравнений марковской теории нелинейной фильтрации для синтеза следящих систем с заданным объектом регулирования, характеризующее меньшим порядком уравнений по сравнению с системами, полученными исходным методом, но требующее информации о характеристиках сигнала задания (производных). Получены математические модели помехозащищенных систем регулирования подачи топлива с электрогидравлическими исполнительными устройствами и индукционными датчиками положения, характеризующиеся отсутствием дополнительных инерционных фильтров как в прямом канале, так и обратной связи, наличием форсирующего звена и множителей. Синтезированы помехозащищенные системы оценки нагрузочных параметров испытываемых дизелей, дающие косвенное измерение нагрузочного момента при наличии фазовых неустойчивостей и шумов в нелинейных датчиках, используя множительные и делительные устройства. С помощью теории модального управления разработаны квазиоптимальные исполнительные системы регулирования (на базе динамометров), обеспечивающие минимальное время переходных процессов при исследовании дизелей на неустановившихся режимах. Предложенные системы регулирования были проверены на цифровых моделях, подтвердивших значительное улучшение динамических свойств данных систем по сравнению с серийными конструкциями.

ПРАКТИЧЕСКИЕ. На основе квазиоптимальных систем оценки и регулирования нагрузочных параметров разработан ряд автоматизированных стендов с ЭВМ в контуре управления для циклических испытаний тракторных дизелей в переходных режимах. Помехозащищенные системы подачи топлива, реализованные на типовых элементах (демодуляторах) и оптимально настроенные модифицированные динамометры (с токовыми датчиками момента) обеспечили требуемый диапазон нагружения испытываемых двигателей. При необходимости дальнейшего увеличения частотного диапазона нагружения предложено использовать динамометры с одновременным регулированием по двум обмоткам возбуждений и помехозащищенными системами оценки. Последние можно использовать и от-

дельно, например, для оценки нагрузочного момента во второй зоне регулирования серийных динамометров. Новизна и эффективность разработанных систем и стендов подтверждены авторскими свидетельствами, протоколами испытаний и актами внедрения.

ПРЕДМЕТ И СТЕПЕНЬ ВНЕДРЕНИЯ. На основании проведенных исследований разработаны и внедрены в НАТИ и его филиалах автоматизированные стенды с ЭВМ в контуре управления для отработки методик ускоренных испытаний тракторных дизелей на надежность, имитации неустановившихся режимов работы двигателей. В составе данных стендов использовались оптимально настроенные модифицированные динамометры ДЭ (ЧССР) и ВАК(ГДР), исполнительные системы подачи топлива, на базе электрогидравлических исполнительных устройств с усилителями УЭГ.Г, оснащенных индуктивными датчиками положения Ид4, ИдБА. Внедрение подтверждено двусторонними протоколами испытаний и актами с реальным экономическим эффектом более 150 тыс.руб. и ожидаемым - более 400 тыс.руб. Данные стенды использовались при создании "Отраслевой методики ускоренных стендовых испытаний на безотказность дизелей сельскохозяйственных тракторов", НАТИ, М., 1984г. и ряда других работ.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ. Автоматизированные стенды при применении методик ускоренных испытаний сократили время испытаний отдельного двигателя в 8-10 раз, а общее время доводки конструкции в 3-4 раза, что дает существенное сокращение сроков внедрения и разработки новых мощных тракторных дизелей, экономию материальных и людских ресурсов при испытаниях. Разработанные исполнительные системы обладают более высоким быстродействием, точностью по сравнению с серийными. Модифицированные динамометры с оптимально настроенными коэффициентами обеспечили время переходного процесса 3-4 периода при малых и долей секунды при больших отклонениях регулируемого параметра, повторяемость и достоверность проводимых экспериментов (частотный диапазон до 5-10 Гц, точность поддержания заданного значения 2-3%). Внедрение помехозащищенных систем подачи топлива дало частотный диапазон регулирования до 5 Гц (при малых отклонениях), точность поддержания заданного режима 2-3%.

АПРОВАЦИЯ РАБОТЫ. Результаты исследований по теме диссертации докладывались на Всесоюзных конференциях "Робототехнические системы" (Челябинск, 1983), "Исследование и совершенствование тракторных конструкций" (Москва, 1983), "Совершенствование тракторных конструкций" (Москва, 1985); Всесоюзном межотраслевом семинаре "Исследование двигателей сельскохозяйственных машин в динамических (не-

установившихся) режимах" (Казань, 1983); отраслевых семинарах "Автоматизация испытаний и проектирования тракторов" (Москва, 1981), "Полупроводниковые преобразователи современных систем электропривода промышленных установок и приборных комплексов" (Ленинград, 1982), научно-технических конференциях ЧПИ, 1979-1985 гг. Конкурсная работа "Исследование систем оценки параметров вращения вала и следящей системы с поворотным трансформатором" получила диплом III степени Всесоюзного конкурса, 1977 г.

ПУБЛИКАЦИИ. Основное содержание работы отражено в 19 печатных работах, среди которых 6 авторских свидетельств.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из предисловия, четырех глав, заключения, списка использованной литературы (165 наименований) и шести приложений: таблицы обзора, техническое описание нагрузочных устройств; коэффициенты для расчета цифровых моделей и оптимальных систем управления динамометров; программы цифровых моделей; акты и справки о внедрении, подтвержденные соответствующими расчетами технико-экономического эффекта и двусторонними протоколами испытаний; справку о проверке приборов, использованных при выполнении диссертационной работы. Диссертация содержит 135 стр. машинописного текста, 32 стр. рисунков и таблиц, 65 стр. приложений.

Автор выражает искреннюю признательность заведующему кафедрой Общей электротехники ЧПИ С.П. Гладышеву за поддержку и сотрудничество при выполнении диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ. Традиционные средства и методы проведения исследовательских доводочных испытаний дизелей позволяют, по оценке ЦНИДИ, лишь на 25% выполнить требуемые объемы испытаний. Стендовые испытания, проводимые по ГОСТ 18509-80, согласно исследованиям специалистам НАТИ, выявляют только 10-15% отказов, возникающих в процессе эксплуатации. Для сокращения сроков внедрения новых конструкций и контроля серийных тракторных дизелей разрабатываются специальные методики ускоренных стендовых испытаний под руководством ведущих специалистов отрасли: И.Н. Величина, А.М. Александрова, В.Я. Аниловича, И.Б. Барского, В.К. Бальяка, В.А. Гусятникова, М.П. Зубиетовой, Р.В. Кугеля и др. Большое внимание всесторонней стендовой оценке качества и доводке дизелей уделяют и зарубежные моторостроительные фирмы.

Вопросами автоматизации испытаний занимаются как зарубежные фирмы ("AVL", "Элин Унион" (Австрия), "Оно-Соки", "Меденша Электрик" (Япония), "Бекман", "Дженерал Моторс" (США), "Хелен-Фруд" (Англия), "Броун Бовери", "Карл Шенк" (ФРГ) и др.), так и ряд отечественных организаций (НАТИ и его филиалы, НАМИ, НИКТИД, ЦНИДИ и др.). Обзор ЦНИДИ, дополненный анализом области тракторостроения, показал, что существующие автоматизированные стенды и комплексы предназначены для испытаний двигателей в установившихся режимах и не соответствуют требованиям методик ускоренных испытаний (длительные циклы с изменением нагрузочного момента и подачи топлива), до 5 Гц при малых отклонениях, долей Гц - при больших), значительно отстали от лучших образцов зарубежной техники. В соответствии с тематикой научно-исследовательских работ, проводимых кафедрой Общей электротехники ЧПИ совместно с НАТИ и его филиалами, исходя из требований методик ускоренных испытаний тракторных дизелей и состояния автоматизации испытаний ДВС в СССР, были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НАГРУЗОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С ИСПЫТУЕМЫМИ ДИЗЕЛЯМИ. Исследования проводились на испытательных стендах НАТИ, ЧФ НАТИ, Урал НИИС НАТИ, ЧПИ. Стенды находились в стадии внедрения и автор принимал непосредственное участие в пуске, настройке, эксплуатации данных объектов. В процессе работы большое внимание было уделено экспериментальному определению конкретных уравнений состояния и наблюдения, нагрузочных устройств, границам применимости уравнений. При этом внимались статические и динамические характеристики как отдельных элементов, так и объекта регулирования (нагрузочных устройств и дизелей) в целом. Статические характеристики получали с помощью универсальных и цифровых приборов В7-16, В5-26, Ц4313, приборов, входящих в комплекты динамометров и стендов, динамические - фиксировались на осциллографы С1-19Б, С1-54, С1-72-72, С1-31, С8-13, самопишущий прибор Н338-П, шлейфовые осциллографы Н-117, К-2-12, магнитографы ЕММ-140 (СССР) и ТЕАС (Япония). Сигналы снимались как с датчиков измерительных устройств, входящих в комплект стендов, так и устройств (в основном шунтов), включаемых в измерительные цепи только на время эксперимента. Данные обрабатывались на ЭВМ серии ЕС, СМ, корреляционно-вычислительном комплексе ТЕАС (Япония). Результаты экспериментов подтверждены документными протоколами испытаний.

Экспериментальные исследования подтвердили выбранные математические модели (рис.1) и показали: на динамику динамометров

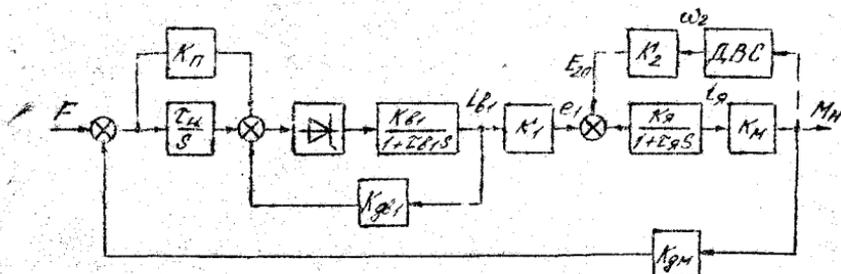


Рис. 1

сильно влияет III, обладающий нелинейной регулировочной характеристикой и малой частотой модуляции; электромагнитные цепи возбуждения и якоря можно описать в периодическими звеньями с постоянными времени T_1, T_2 и коэффициентами K_1, K_2 , причем T_1 порядка секунды, а T_2 - сравнима с периодом напряжения питания T_1 ; ЭДС вращения пропорциональны току возбуждения управляющей машины (K_1) и частоте вращения динамометра (K_2); при однозонном регулировании момент нагрузки M_n пропорционален току якоря I_a (K_3), при двухзонном - произведению токов якоря и возбуждения динамометра $I_a I_f$ (K_3) для ненасыщенной машины; частота вращения дизеля ω_2 (на регуляторной ветви) меняется незначительно и в рабочем диапазоне нагрузок (определяется конкретно для каждого типа двигателя, например, для Д-160 до 500 Нм) обратной связью по ЭДС вращения динамометра можно пренебречь (E_{20}); для настройки можно регулировать коэффициенты обратных связей по моменту (K_5), току возбуждения (K_3), сигналу интегратора (T_n), прямого канала (K_n).

Исследования показали, что в режиме поддержания момента система управления динамометром ДС 1036-4/М оказалась неустойчива и было предложено использовать токовый датчик момента. Модифицированный динамометр с учетом дискретных свойств III описывается уравнениями:

$$\bar{Y}(t) = B(t-t_n) \bar{Y}_n + \bar{P}(t, t_n), \quad (I)$$

где $\bar{Y}(t), \bar{Y}_n$ - вектора текущих значений переменных состояния и началь-

ных условий; $B(\cdot)$, $\bar{P}(\cdot)$ - матрица коэффициентов и вектор свободных членов, зависящие от времени t и момента открывания в предыдущем периоде $t - \pi$, отсчитываемых от начала предыдущего периода.

В соответствии с формулой (1) были разработаны цифровые модели динамометров с испытываемыми дизелями, реализованные на ЕС ЭВМ.

Нужно учесть, что в дискретно-непрерывных моделях динамометров имеем оценочные значения переменных состояния. Сигналы с датчиков токов и ЭДС поступают в систему управления как непосредственно из силовых цепей, так и через трансформаторную развязку. Для датчиков тока на основе шунтов и дополнительных полюсов, а также частоты вращения, можно записать:

$$Z_x(t) = S_x(t, X) + N_x(t), \quad (2)$$

где $S_x(\cdot)$ - полезный сигнал, линейно зависящий от измеряемого параметра; $N_x(\cdot)$ - помехи, аппроксимируемые с учетом экспериментальных исследований и последующей обработки результатов измерений на комплексе ТЕАС белыми шумами с нулевым средним и спектральными плотностями N_x (в частности для динамометров $S_{AK} N_x = 4 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{с}$; $N_x = 6 \cdot 10^{-8} \text{ с}^2/\text{с}$).

Во втором случае, предложенном в последних моделях динамометров ДЭ и САК, происходит амплитудная модуляция информационного параметра и реальный выходной сигнал датчика равен

$$Z_x(t) = K_x \sin(\omega_x t + \varphi_x) + N_x(t), \quad (3)$$

где K_x, ω_x, φ_x - коэффициент преобразования, частота модуляции и сдвиг по фазе относительно напряжения питания, последний зависит от измеряемого параметра X ; $N_x(\cdot)$ - помехи, аппроксимируемые с учетом потерь пропускаемости системы белыми шумами с нулевым средним и спектральными плотностями N_x .

При косвенном измерении нагрузочного момента для однозонного регулирования используется только датчик тока якоря, для двухзонного регулирования необходимы датчик тока возбуждения (при небольших изменениях тока возбуждения) или ЭДС вращения динамометра. Полезный сигнал датчика тока якоря при этом можно записать в виде:

$$S_A(I_A) = K_{\omega_3} \frac{M_H}{k_3 I_A B_2}, \quad (4) \quad S_A(I_A) = K_{\omega_3} \frac{M_H \omega_2}{E_2}, \quad (5)$$

где K_{ω_3} - коэффициент преобразования шунта (дополнительного полюса).

Серийных исполнительных устройств перемещения рычага рейки топливного насоса, обеспечивающих требуемую скорость перемещения, как отмечают сами разработчики методик, не существует. В качестве базовых для разработки были выбраны два варианта: электромеханиче-

ский (редуктор с двигателем постоянного тока Д-82А и потенциометром обратной связи по положению) и электрогидравлический (электрогидроусилитель с насосной станцией и индуктивным датчиком положения). Для управления использовался широтно-импульсный преобразователь ШИМ, состоящий из инвертирующего интегратора и элемента с релейной характеристикой, соединенных последовательно и охваченных обратной связью. Вторичный преобразователь индукционного датчика собран по стандартной схеме (генератор питания и демодулятор). В процессе испытания выявилась недостаточная надежность электромеханической системы подачи топлива (выход из строя двигателя, потеря контакта в потенциометре обратной связи после определенного срока эксплуатации). Для дальнейших исследований более предпочтителен оказался второй вариант, реализованный в НАИИ. Индуктивный датчик относится к двухконтурным электромагнитным преобразователям и может охарактеризован уравнением, аналогичным (7). Прямой канал электрогидравлической системы в области без насыщений описывается стохастическим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dh}{dt} = k_{2n} U_{y3} + \pi r(t), \quad (6)$$

где h , U_{y3} - положение рычага и напряжение управления; k_{2n} - коэффициент, вычисляемый из экспериментальных данных и равный 6-8 мм/Вс в зависимости от настройки; $\pi r(t)$ - помеха, определяемая конструктивными особенностями гидросистемы и внешними шумами.

Предложенные математические модели послужили основой для последующего синтеза квазиоптимальных систем оценки и регулирования.

СИНТЕЗ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ОЦЕНКИ И РЕГУЛИРОВАНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ. Динамометры, как дискретно-непрерывные системы, можно исследовать по линейному приближению разностных уравнений:

$$\Delta \bar{Y}_{n+1} = A \Delta \bar{Y}_n + B_1 \Delta \bar{X}_n + B_2 \Delta \bar{X}_{n+1}, \quad (7)$$

где $\Delta \bar{Y}_n, \Delta \bar{X}_n, \Delta \bar{X}_{n+1}$ - приращения векторов состояния и входных воздействий (на нелинейные элементы) на (n) и ($n+1$) шагах; A, B_1, B_2 - матрицы $(k \times k)$ и $(e \times k)$ частотных производных от \bar{Y}_{n+1} по $\bar{Y}_n, \bar{X}_n, \bar{X}_{n+1}$ в точке установившегося режима.

Синтез быстродействующих систем с объектом регулирования такого типа предложен в работах С.П.Гладышева, где по уравнениям состояния объекта и регулятора получают уравнение замкнутой системы, по заданным значениям корней которого и выбирается матрица регулятора. Граничным условием синтеза является полная управляемость объекта и наличие информации по всем переменным состояния. В случае неполной информации предлагается использовать наблюдательные устройства Кал-

мана или Льюинберга, определяющие недостающие переменные косвенным путем по известной информации. Предложенный метод удобен тем, что при наличии обратных связей по всем переменным, он не меняет структуру управления существующей системы, оптимизируя коэффициенты настройки. Уравнение замкнутой системы записывается в виде:

$$\Delta \bar{Y}_{n+1} = (E - R_2 R^{-1})(A^m + DR) \Delta \bar{Y}_n, \quad (8)$$

где E - единичная матрица; R - матрица обратных связей, верхнюю часть которой составляет матрица коэффициентов обратных связей Z ; D - обратимая матрица, составленная из матриц:

$$D = [A^{m-1} D_1, A^{m-2} D_2, \dots, A R_2 + D_1], \quad (9)$$

m - отношение порядков векторов состояния и управления.

При использовании критерия процессов конечной длительности

Я.З.Цыпкина оптимальная матрица обратных связей равна

$$R = -D^{-1} A^m. \quad (10)$$

Оптимальные коэффициенты обратных связей системы находятся как часть матрицы R . В соответствии с математическими моделями динамометров имели три случая расчета:

1. Динамометр $D\delta$ с ограниченной полосой пропускания. Он характеризуется уравнением (6) второго порядка и матрица R находится как

$$R = -D^{-1} A^2, \quad D = [A D_1, A D_2 + D_1]. \quad (11)$$

2. Динамометры однозонного регулирования при небольших изменениях частоты вращения. Уравнение (6) - третьего порядка и расчет идет по формулам

$$R = -D^{-1} A^3, \quad D = [A^2 D_1, A^2 D_2 + A D_1, A D_2 + D_1]. \quad (12)$$

3. Динамометры с регулированием по двум обмоткам возбуждения.

В этом случае вектор состояния определяется как:

$$\bar{Y}(t) = BQ(t, \bar{T}_n) \bar{Y}_n + \bar{P}(t, \bar{T}_n),$$

где $BQ(t, \bar{T}_n)$ - матрица и вектор свободных членов, зависящие от текущего момента времени t и двухмерного вектора моментов включения тиристорных преобразователей динамометров \bar{T}_n . В соответствии с этим берется описание контура в двух периодах и оптимальная матрица

$$R \text{ равна: } R = -D^{-1} A^2, \quad D = [A D_1, A D_2 + D_1]. \quad (14)$$

Матрицы A, D_1, D_2 находятся дифференцированием уравнением состояния. Расчет производился на ЕС ЭВМ.

Требуется наличие информации по всем переменным определило задачу синтеза систем оценки. Выходные сигналы датчиков представля-

ют аддитивную смесь полезного сигнала, нелинейно зависящего от информационного параметра, и помехи, аппроксимируемой с учетом экспериментальных данных белым шумом. Основы синтеза систем оценки с нелинейными датчиками такого типа заложены в работах Р.Л.Стратоновича, предложившего теорию оптимальной нелинейной фильтрации марковских информационных сообщений. При разработке помехозащищенных систем оценки нагрузочных параметров использовались математические модели квазиоптимальных систем оценки, синтезированных по априорно заданным стохастическим уравнениям информационных параметров (или уравнениям состояния) и наблюдения, предложенные В.И.Тихоновым, Н.К.Кульманом, Д.Снайдером, М.С.Ярлыковым. Для динамометров с регулированием по одной и двум обмоткам возбуждения с учетом уравнений наблюдения(2)-(5) получили четыре варианта систем оценки нагрузочных параметров:

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_H^* &= -\omega_M M_H^* + K_{11}F_1, & \dot{M}_H^* &= -\frac{M_H^*}{T_{\beta 2}} + \frac{K_{\beta 2} K_M}{T_{\beta 2}} (\omega_0 - K_2 \omega_0^*) + K_{11}F_1 + K_{12}F_2, \\ M_H^*(t_0) &= M_0; & \dot{\omega}_2^* &= -\omega_M \omega_2^* + K_{21}F_1 + K_{22}F_2, \end{aligned} \right\} (16)$$

$$\text{где } F_1 = \frac{K_{\beta 1} \sin(\omega_0 t + \vartheta_0)}{K_M K_{\beta 2}} \left[Z_{\beta 1}(t) - \frac{K_{\beta 1} M_H^* \sin(\omega_0 t + \vartheta_0)}{K_M} \right], \quad F_2 = \frac{K_T}{K_{\omega 2}} \left[Z_{\omega}(t) - K_{T\Gamma} \omega_0^* \right].$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_H^* &= -\omega_M M_H^* + K_{11}F_1 + K_{12}F_2, \quad M_H^*(t_0) = M_0; \\ \dot{\omega}_2^* &= -\omega_M \omega_2^* + K_{21}F_1 + K_{22}F_2, \quad \omega_2^*(t_0) = \omega_0; \end{aligned} \right\} (17)$$

$$\text{где } F_1 = \frac{2K_{\omega 2}}{K_{\beta 1} T_{\beta 2} L_{\beta 2}} \left[Z_{\beta 1}(t) - \frac{M_H^*}{K_{\beta 1} K_{\beta 2}} \right], \quad F_2 = \frac{K_{\omega 2}}{K_{\beta 1} K_{\beta 2} L_{\beta 2}} \left[\frac{K_{\omega 3} M_H^*}{K_{\beta 1} L_{\beta 2}} - Z_{\omega}(t) \right] + \frac{K_{\omega 2}}{K_{\beta 2}} \left[Z_{\omega}(t) - K_{\omega 2} \omega_2^* \right].$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{M}_H^* &= -\omega_M M_H^* + K_{11}F_1 + K_{12}F_2, \quad M_H^*(t_0) = M_0; \\ \dot{\omega}_2^* &= -\omega_M \omega_2^* + K_{21}F_1 + K_{22}F_2, \quad \omega_2^*(t_0) = \omega_0; \end{aligned} \right\} (18)$$

$$\text{где } F_1 = \frac{K_{\omega 3} \omega_2^*}{K_{\beta 1} E_{\beta 2}} \left[Z_{\beta 1}(t) - \frac{K_{\omega 3} M_H^* \omega_2^*}{E_{\beta 2}} \right], \quad F_2 = \frac{K_{\omega 3} M_H^*}{K_{\beta 1} E_{\beta 2}} \left[Z_{\beta 1}(t) - \frac{K_{\omega 3} M_H^* \omega_2^*}{E_{\beta 2}} \right] + \frac{K_T}{K_{\omega 2}} \left[Z_{\omega}(t) - K_{T\Gamma} \omega_0^* \right],$$

где $\omega_M, \omega_{\beta 1}, \omega_{\beta 2}$ - коэффициенты, определяемые априорно, исходя из требуемой полосы пропускания системы; $U_{\beta 2}$ - напряжение на зажимах якорной цепи динамометра; $K_{\beta 2}, T_{\beta 2}, K_M, K_2$ - постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными особенностями динамометров; $K_{11}, K_{12}, K_{21}, K_{22}$ - кумулянты, определяемые по уравнениям оценки.

Системы имеют нелинейные блоки типа множителей и делителей, охваченных перекрестными связями, блок вычисления кумулянт, определяющий текущие оценки ошибок. Использование данных систем оценки расширило класс наблюдательных устройств и позволило использовать метод модального управления для расчета систем с линейным объектом регулирования и нелинейными датчиками параметров. При синтезе систем управления полностью имеет смысл разрабатывать уже саму систему помехозащищенной.

Синтез нелинейных стохастических следящих систем опирается на работы Р.С.Стратоновича и существует несколько путей: через семинварианты с разложением в окрестности условной вероятности оценки (И.Е.Казakov), последовательным приближением с помощью принципа оптимальности Белмана (Г.Е.Колосов), использованием квазиоптимальных уравнений фильтрации марковских процессов (В.С.Жабреев). Структура оптимальной следящей системы с заданным объектом регулирования и датчиками, синтезированной по критерию минимума вредне-квадратической ошибки, дана у В.С.Жабреева. Для упрощения синтеза с учетом особенностей испытательных стендов было предложено использовать для определения уравнений оптимального управления оценку ошибки:

$$\dot{\bar{E}}^* = \bar{F}_x(\bar{x}, t) - \bar{\Psi}(\bar{x}, \bar{E}, \bar{u}, t) + U_0^*(t) D \{ \bar{S}(\bar{x}, \bar{E}, t) \} N_z^{-1} [\bar{Z}(t) - \bar{S}(\bar{x}, \bar{E}, t)]; \bar{E}^*(t_0) = \bar{E}_0, \quad (19)$$

где \bar{E}^* - оценка ошибки
 \bar{x} - (разности векторов задания \bar{x} и состояния \bar{y});
 $\bar{\Psi}(\cdot)$, $\bar{S}(\cdot)$ - нелинейные вектор-функции из уравнения состояния и наблюдения

$$\dot{\bar{y}}(t) = \bar{\Psi}(\bar{y}, \bar{u}, t) + \bar{w}_y(t), \quad \bar{y}(t_0) = \bar{y}_0, \quad (20) \quad \bar{z}(t) = \bar{S}(\bar{y}, t) + \bar{v}_z(t), \quad (21)$$

$\bar{w}_y(t)$, $\bar{v}_z(t)$ - помехи, аппроксимируемые с учетом полосы пропускания белыми шумами с матрицами спектральных плотностей N_y и N_z ; $\bar{F}_x(\cdot)$ - составляющая, равная \bar{x} или находящаяся из априорно известного закона изменения вектора задания; $V_0^*(t)$ - матрица кумулянт ($n \times n$), вычисляемая по формуле:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0^*(t) = & D^T \{ \bar{F}_x(\bar{x}, t) - \bar{\Psi}(\bar{x}, \bar{E}, \bar{u}, t) \} V_0^*(t) + V_0^*(t) D \{ \bar{F}_x(\bar{x}, t) - \bar{\Psi}(\bar{x}, \bar{E}, \bar{u}, t) \} + \\ & + N_y + V_0^*(t) D \{ D \{ \bar{S}(\bar{x}, \bar{E}, t) \} N_z^{-1} [\bar{Z}(t) - \bar{S}(\bar{x}, \bar{E}, t)] \} V_0^*(t), \quad V_0^*(t_0) = V_0; \end{aligned} \quad (22)$$

$D \{ \cdot \}$ - матрица Якоби; \bar{E}_0 , \bar{y}_0 , V_0 - начальные условия.

Оптимальное управление и выбиралось из условия $\dot{\bar{E}}^* = \dot{\bar{E}}^* = 0$ и находится по уравнению:

$$0 = \bar{F}_x(\bar{x}, t) - \bar{\Psi}(\bar{x}, \bar{u}, t) + V_0^*(t) D \{ \bar{S}(\bar{x}, t) \} N_z^{-1} [\bar{Z}(t) - \bar{Z}(t)], \quad (23)$$

где $V_0^*(t)$ - матрица кумулянт, взятая в точке $\dot{\bar{E}}^* = 0$.

Структура оптимальной следящей системы показана на рис. 2

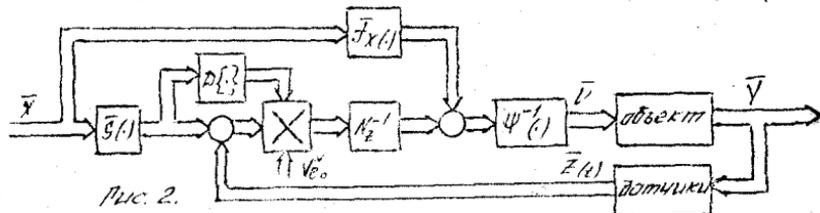


Рис. 2.

Уравнение помехозащищенной системы подачи топлива, найденное из уравнений (6), (7) имеет вид:

$$\Delta y_3 = \frac{\dot{y}}{K_{21}} + \frac{K_{e0}^*}{K_{21}} F_1 y, \quad (2A) \quad K_{e0}^* = Nk + K_{e0}^{*2} F_2; \quad (2B)$$

где $F_1 = \frac{k h \sin(\omega k t + \varphi_k)}{Nz} [Z_k(A) - K_k \times \sin(\omega k t + \varphi_k)]$, $F_2 = \frac{k^2 h \sin^2(\omega k t + \varphi_k)}{Nz}$.

Квазиоптимальные следящие системы, полученные по уравнению оценки ошибки, отличаются более простой структурой, причем при линейном объекте регулирования структура систем, полученным исходным и модифицированным методами, совпадает и различие определяется только блоком вычисления кумулянт. Предложенные системы отличаются отсутствием дополнительных инерционных звеньев как в прямом канале, так и обратной связи, наличием форсирующего звена, что определяет хорошие динамические свойства систем, возможность испытаний дизелей в переходных режимах.

ВНЕДРЕНИЕ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ. Для предварительной проверки полученных квазиоптимальных систем использовались цифровые модели динамометров, в которых вместо существующих подставлялись оптимальные коэффициенты. При моделировании выявилось, что при малых отклонениях система обеспечивает оптимальное быстрое действие (рис.3), а при больших - входит в долгозатухающий автоколебательный режим (рис.4):

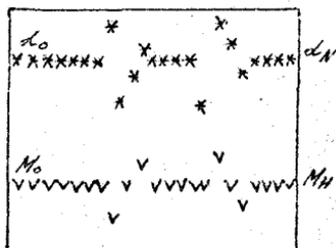


Рис. 3

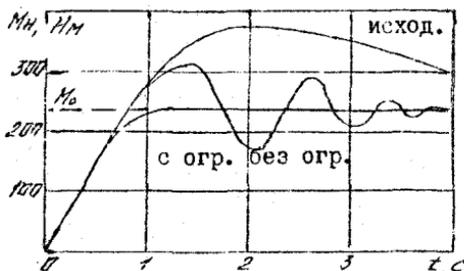


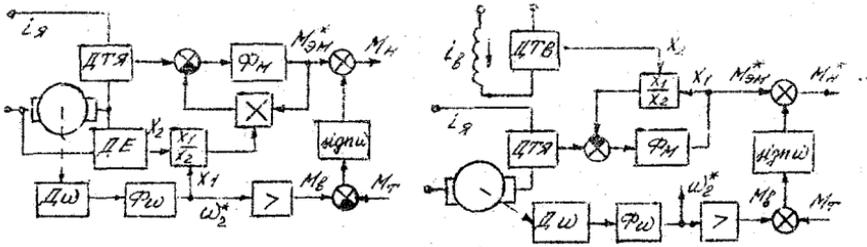
Рис. 4

Причиной неустойчивой работы явилась ограниченность выходного напряжения ПИ, что повлекло резкое увеличение сигнала ПИ-регулятора. Для исключения этого недостатка было введено ограничение по выходу ПИ-регулятора. Доработанная система обеспечила частотный диапазон изменения регулируемого параметра до 5-10 Гц при малых отклонениях, долей Гц - при больших. При необходимости дальнейшего увеличения частотного диапазона предложено использовать одновременное регулирование по обеим обмоткам возбуждения (а.с.1163177)

с введением датчиков тока возбуждения (а.с. II7I683, I255884). Системы оценки нагрузочных параметров, используя ряд допущений (усреднение кумулянт, фильтрация высоких частот и т.д.), можно описать уравнениями:

$$M_H^* = -\omega_M M_H^* + K_M^* \sin(\omega_0 t + \varphi_0) [E_0(t) - \frac{K_A M_H^*}{K_M} \sin(\omega_0 t + \varphi_0)]. \quad (26)$$

Предложенная система оценки реализована на демодуляторе, осуществляющем перемножение выходного сигнала датчика и опорного сигнала. При регулировании по двум обмоткам возбуждения системы оценки нагрузочных параметров могут преобразованы к виду, показанному на рис. 5, Φ_M, Φ_{ω} — линейные фильтры.



пол.реш.по заявке 3896288

а.с. III2254

Рис. 5

Для повышения точности измерений дополнительно определяются постоянная M_T и переменная M_f , составляющие момента трения. Расчетная точность полученных систем оценки 0,5%.

Аналогично были преобразованы и уравнения квазиоптимальных систем подачи топлива:

$$\dot{U}_{y_3} = \frac{\dot{x}}{K_{2n}} + 2K_{e_0}^* \sin(\omega_0 t + \varphi_0) [E_0(t) - K_{A_1}^* \sin(\omega_0 t + \varphi_0)]. \quad (27)$$

Производную от сигнала задания получают расчетным путем (программа испытания известна заранее) и вводят в программно-задающее устройство. Сама система реализована на стандартных элементах с минимальным количеством нелинейных звеньев (один множитель).

Автоматизированные стенды находились в стадии внедрения и разработка данных систем проводилась совместно с отработкой и других элементов стендов. Краткая характеристика и результаты внедрения автоматизированных стендов даны в таблице:

Предприятие стенд	Динамо- метр	Система подачи топлива	Тип исп. ДВС	Част. диап.		Точ- ность		Эффект	
				Мн	Р	Мн	Р	руб. тыс.	уск. раз
				Гц	Гц	%	%		
НАТИ СИ <i>3AK-N670</i>		релейная	A-4I	5	-	3(I)	-	42	4,5
СИО1 <i>LPA-160</i>		рел.	A-4I	-	5	-	3	147	4,5
СИО2 <i>LPA-250</i>		след.	D-240	-	5	-	3(I)	(147)	4,5
СИО <i>DS1446-4K/V</i>		эл.-гидр.	<i>8187-330</i>	5-10	5	3(I)3(I)	(399)	3,6	
ЧФ НАТИ СИО2 <i>DS1036-4/N</i>		эл.-мех.	D-160	5	2	3(I)3(I)	-	4,5	
УралНИИС НАТИ <i>DS1446-4K/V</i>			A-0Im	5-10	-	3(I)	-	117	4,5

(.) - точность в установившемся режиме;

(.) - ожидаемый экономический эффект.

В ЧФ НАТИ разработан стенд программного управления для обработки методик ускоренных испытаний промышленных тракторов. Он включает в себя ЭВМ "УПО-1", пульт автоматки, исполнительные системы регулирования нагрузочного момента (динамометр *DS1036-4/N*) и подачи топлива (электрохимическая). Параметры схемы замещения динамометров, определенные в ходе экспериментов, были заложены в программу и найдены оптимальные коэффициенты при выбранном установившемся режиме ($M_n=237$ Нм). Для настроенного модифицированного динамометра (с токовым датчиком момента) были сняты статистические характеристики, осциллограммы переходных процессов. Время переходного процесса при больших отклонениях 0,5-1 с и зависит от амплитуды скачка, при малых - 0,1 с, точность поддержания заданного значения регулируемой величины 2/3% (в установившихся режимах - 1%). Стенд программного управления обеспечил требуемые режимы нагрузки дизеля, отработал более 800 часов при создании методики ускоренных испытаний двигателей промышленных тракторов на безотказность, разработанной отделом двигателей ЧФ НАТИ и утвержденной в НАТИ.

На Урал НИИС НАТИ внедрена исполнительная система регулирования нагрузочного момента в составе автоматизированного стенда для имитации нагрузочных режимов работы испытуемого дизеля, включающего в себя динамометр *DS1446-4K/V* и ЭВМ "Искра-125". В ходе исследований была произведена настройка динамометра (аналогично предыдущему стенду), разработана программа для ЭВМ и проведены сравнительные испытания дизелей с серийным и опытным регуляторами.

Наиболее полно исследования проводились в НАТИ, где отработывалась отраслевая методика ускоренных испытаний тракторных двигателей. В процессе работы были созданы автоматизированные стенды (СИ1, СИ01, СИ02, СИ10) с регулированием нагрузочного момента (динамометры *SAK-N670, LPA-160, LPA-250, РСНН46-4KX*) и подачи топлива (релейные и следящие электрогидравлические системы с индуктивными датчиками положения). Исполнительные системы регулирования нагрузочного момента (динамометры) настраивались аналогично предыдущим системам. Наибольшим переделкам был подвергнут динамометр *SAK-N670*, представлявший до этого разомкнутую систему регулирования с управлением от реостатов в цепях возбуждения. Была разработана двухконтурная система регулирования (по токам возбуждения и якоря), реализованная на тиристорном преобразователе АТЕЗ-230/50 с трансформаторным датчиком тока возбуждения и шунтовым датчиком тока якоря. При практической настройке возникло ограничение по быстродействию со стороны операционного усилителя (регулятора тока возбуждения), входящего в комплект АТЕЗ, у которого фронт нарастания выходного сигнала ограничен корректирующими емкостями, но даже в этом случае время переходного процесса удалось уменьшить в два раза. В первоначальном варианте помехозащитной системы подачи топлива использовался демодулятор, собранный по стандартной схеме с опорным сигналом от напряжения питания. Система обеспечила диапазон регулирования положения штока 8 мм, обработку сигнала задания с точностью 3%, частотный диапазон изменений регулируемого параметра до 5 Гц при малых отклонениях. В дальнейшем был разработан новый вторичный преобразователь, увеличивший диапазон регулирования положения штока до 20 мм.

Результаты исследования подтверждены двухсторонними протоколами испытаний и получены акты о внедрении с экономическим эффектом более 400 тыс. рублей. Время испытаний отдельного двигателя сократилось в 8-10 раз, а время испытаний на надежность по сравнению с полевыми снизилось с 3 лет до 0,6-0,7 года.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

I. Уточненные с помощью экспериментальных и теоретических исследований математические (структурные схемы и уравнения) составляющие, наблюдения) и цифровые модели нагрузочных устройств с испытуемыми дизелями учитывают особенности методик ускоренных испытаний тракторных двигателей, дискретность и нелинейность тиристорных

преобразователей динамометров (типа *DS* и *SAK*), влияние помех на выходные сигналы нелинейных датчиков нагрузочных параметров, объект регулирования.

2. При рассмотрении динамометров, как дискретно-непрерывных систем с информацией о всех переменных состояниях, методом модального управления по критерию процессов конечной длительности разработаны квазиоптимальные системы регулирования нагрузочного момента, позволившие в отличие от серийных конструкций динамометров исследовать тракторные дизели в переходных режимах. При оптимизации систем использовались динамометры с серийными схемами управления и помехозащищенными токовыми датчиками момента, что определило минимальную переделку нагрузочных устройств и быстрое внедрение полученных результатов на стендах.

3. Предложенные системы регулирования нагрузочного момента предварительно опробовались на цифровых моделях, выявивших необходимость введения ограничения на выходе ПИ-регулятора при больших отклонениях регулируемого параметра. Доработанные исполнительные системы обеспечили минимальное время переходного процесса (2-3 периода), частотный диапазон регулирования 5-10 Гц при малых отклонениях и долей Гц - при больших, точность поддержания заданного значения 2-3% (в установившемся режиме - 1%). Дальнейшее увеличение частотного диапазона обеспечивается изменением частоты вращения управляемой машины (а.с. № 1030055), одновременным регулированием по двум обмоткам возбуждения (а.с. № 1163177, 1171683, 1255384).

4. На основании экспериментально определенных уравнений состояния и наблюдения с помощью теории нелинейной фильтрации по критерию минимума среднеквадратической ошибки найдены математические модели квазиоптимальных систем оценки нагрузочных параметров дизелей, характеризуемые наличием нелинейных элементов (множители и делители), связанных между собой перекрестными связями, блока вычисления кумулянт, дающего текущие оценки ошибок измерения. Данные системы отличаются от других измерительных систем такого типа наличием нелинейного фильтра, охваченного обратной связью с делителем, на вход которого подаются сигналы с датчика тока возбуждения (а.с. 1112254) или ЭДС (пол.реш. по заявке 3896288).

5. Синтезированы марковским методом нелинейной фильтрации по критерию минимума среднеквадратической ошибки модифицированные модели помехозащищенных следящих систем с заданным объектом регулирования отличаются более низким порядком уравнений оценки и простой структурной схемой по сравнению с системами, полученными исходным мето-

дом, но требуют более полной информации о входном сигнале (производных).

6. Практически реализованные, помехозащищенные системы подачи топлива (электрогидравлические с индуктивными датчиками положения), отличающиеся отсутствием дополнительных инерционных звеньев как в прямом качале, так и обратной связи, обеспечили частотный диапазон регулирования 5 Гц, точность поддержания заданной величины 3% (в установившемся режиме - 1%).

7. Автоматизированные стенды на базе квазиоптимальных систем оценки и регулирования нагрузочных параметров позволили исследовать переходные режимы двигателей на циклических режимах, задаваемых ЭВМ, что дало возможность отработать ряд методик ускоренных испытаний тракторных двигателей, в том числе и отраслевых. На автоматизированные стенды для ускоренных испытаний дизелей с разработанными исполнительными системами регулирования нагрузочного момента и подачи топлива (положения рычага рейки) получены акты внедрения с соответствующими протоколами испытаний в НАТИ, Урал НИИС НАТИ, ЧФ НАТИ с суммарным экономическим эффектом более 400 тыс. руб. Их внедрение обеспечивает сокращение сроков испытаний отдельного дизеля в 8-10 раз, а общее сокращение времени испытаний при использовании одного автоматизированного стенда по сравнению с полевыми с 3 лет до 0,6-0,7 года.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. А.с. 1080055 СССР, МКИ G 01 M 13/02 Стенд для испытания трансмиссий/А.И.Школьников, В.А.Плотников, Ю.Д.Яснев и В.Л.Федяев.- Оpubл. 15.03.83, Бюл. № 10

2. А.с. 1112254 СССР МКИ G 01 M 15/00. Стенд для испытания двигателя внутреннего сгорания/В.С.Жабреев, Л.Л.Михайльский, С.П.Гладышев, Ф.В.Кальнов и В.Л.Федяев.-Оpubл. 07.09.84, Бюл. № 33.

3. А.с. 1163177 СССР, МКИ G 01 M 13/02. Стенд для испытания трансмиссий/ А.И.Школьников, Ю.Д.Яснев, А.П.Мигеев и В.Л.Федяев.- Оpubл. 23.06.85, Бюл. № 23

4. А.с. 1171683 СССР, МКИ G 01 M 13/02. Стенд для испытания трансмиссии транспортных средств/ А.И.Школьников, А.Я.Эргард, В.Л.Федяев и А.П.Мигеев.-Оpubл. 07.08.85, Бюл. № 29

5. А.с. 1255884 СССР, МКИ G 01 M 13/02. Стенд для испытаний трансмиссий транспортных средств /А.И.Школьников, В.Л.Федяев.- Оpubл. 07.09.86, Бюл. № 33

6. А.с. по заявке 3896288/25-06 СССР. Стенд для испытания двигателей внутреннего сгорания /Л.Л.Михайльский, В.С.Жабреев, В.А.

Куцевалов, С.П.Гладышев, П.Д.Лупачев, В.Л.Федяев и С.С.Софонов.-
Решение о выдаче от 26.09.85.

7. Автоматизированный стенд для испытания трансмиссий трактора с ЭВМ в контуре управления /Л.Л.Михальский, В.И.Сапроненко, В.П.Чумакин, С.П.Гладышев, В.Л.Федяев//Экспресс-инф.Сер., Тракторы и двигатели/ЦИИТЭИ тракторосельхозмаш.-1984.-Вып.7.-С.1-5.

8. Житков В.А., Кузнецов В.А., Федяев В.Л. Исследование систем оценки параметров вращения вала и следящей системы с поворотным трансформатором//Изв.вузов.Электромеханика.-1977.-№ 6.-С.730.

9. Михальский Л.Л., Гладышев С.П., Федяев В.Л. Настройка канала управления нагрузочным моментом стенда испытания ДВС на неустановившихся режимах//Экспресс-инф.Сер., Тракторы и двигатели/ЦИИТЭИ тракторосельхозмаш.-1982.-Вып.16.-С.24-30.

10. Реализация переменных режимов работы двигателей тракторов с механической трансмиссией при ускоренных испытаниях/В.А.Гусятников, В.Л.Дегтярев, С.П.Леоньев, А.П.Михеев, В.Л.Федяев//Исследование двигателей сельскохозяйственных машин в динамических (неустановившихся) режимах:Тез.докл.Всесоюз.межотрас.семина.,13-15 сент.-1983г.-Казань, 1984.-С.69-70.

11. Регулирование момента нагрузки в стендах для испытания ДВС на базе машин постоянного тока/Л.Л.Михальский, В.П.Чумакин, С.П.Гладышев, В.Л.Федяев//Экспресс-инф.Сер., Тракторы и двигатели/ЦИИТЭИ тракторосельхозмаш.-1984.-Вып.2.-С.1-6.

12. Федяев В.Л. Исполнительная следящая система управления с введением нелинейных обратных связей//Информационные и робототехнические системы/Челяб.политех.ин-т(ЧПИ).-Челябинск,1985.-С.90-92.

13. Федяев В.Л. Расчет оптимальных систем управления динамометром типа //Аннотированный указатель разработок института по проблематике САПР/Челяб.политех.ин-т(ЧПИ).-Челябинск,1984.-С.23.

14. Федяев В.Л. Системы автоматического управления и регулирования параметров ДВС в стенде для ускоренных испытаний на безотказность//Совершенствование тракторных конструкций:Тез.докл.Всесоюз.конф. 3-5 июня 1985г.-М.,1985.-С.61.

15. Федяев В.Л. Синтез испытательного стенда с учетом помех датчика обратной связи по скорости//Проектирование автоматических систем и элементов/Челяб.политех.ин-т(ЧПИ).-1983.-С.47-49.

16. Федяев В.Л. и др. Настройка оптимизирующих регуляторов контура управления током Г-Д на автоматизированном стенде испытаний ДВС:Инф.листок о научно-техн.достижении № 85-33-Челяб.межотрасл. Террит.центр научно-техн.информации и пропаганды,1985.-4с.

17. Федяев В.Л. и др. Исследование испытательного стенда на основе машин постоянного тока (тип DS)// Экспресс-инф. Сер., Тракторы, самоходные шасси и двигатели, агрегаты и узлы/ЦНИИЭИ тракторо-сельхозмаш.-М., 1981.-Вып.20.-С.21-26.

18. Федяев В.Л. и др. Системы оценки параметров вращения привода робота//Роботы и робототехнические системы:Матер.Ш Всесоюз. конф., 7-10 сент. 1983г.-Челябинск, 1984.-С.53-61.

19. Чумакин В.П., Федяев В.Л. Автоматизированная система стендовых испытаний трансмиссий трактора с ЭВМ в контуре управления//Исследования и совершенствование тракторных конструкций:Тез. докл. Всесоюз. конф., 31 мая - 1 июня 1983г.-М., 1983.-С.45.