

М 432331

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена
Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

ЛЕОНОВ ИГОРЬ ВЛАДИМИРОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
КОМБИНИРОВАННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ КОРРЕКТИРОВАНИЯ
ТОПЛИВОПОДАЧИ ПО ДАВЛЕНИЮ НАДУВОВОГО ВОЗДУХА

Специальность 05.04.02 - тепловые двигатели

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 1985

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Долганов К.Е.

Доктор технических наук, профессор Махачко М.Г.

Доктор технических наук, профессор Роганов С.Г.

Ведущее предприятие указано в решении ученого совета

Защита состоится " 1985 г.
в . . . часов на заседании специализированного совета Д.053.15.10
"Тепловые и гидравлические машины" МВТУ им.Н.Э.Баумана по
адресу: 107005, Москва, Лефортовская набережная, д. 1, корпус
"Энергомашиностроение".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
им. Н.Э.Баумана.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные
печатью, просим направлять по адресу: 107005, Москва, 2 -я
Бауманская улица, д. 5, МВТУ им. Н.Э.Баумана, ученому секретарю
специализированного совета Д.053.15.10.

. 1985 г.

ОВЦЕВ И.Г.

Под:
Л-970

. зак.665

М432331

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важнейших задач развития народного хозяйства является повышение качества машин. Эта задача в первую очередь должна решаться на стадии проектирования. Дизель с турбонаддувом является основным типом мощных двигателей транспортного, строительного и сельскохозяйственного назначения. Структура и параметры системы автоматического регулирования его оказывают определяющее влияние на эксплуатационные характеристики машинных агрегатов. Вот почему ускорение технического прогресса в двигателестроении связано с повышением агрегатной мощности, улучшением экологических показателей и повышением экономичности комбинированного двигателя. Применение турбонаддува отвечает этим задачам и ведет также к снижению металлоемкости ДВС.

М 432231
Вместе с тем, работа комбинированного двигателя на неустановившихся режимах в некоторых случаях сопровождается рядом нежелательных явлений: повышением дымности и токсичности выхлопных газов, снижением индикаторного КПД и экономичности. Следовательно, улучшение технико-экономических показателей комбинированного двигателя в условиях эксплуатации на неустановившихся режимах является важным резервом народного хозяйства и должно закладываться уже на стадии проектирования.

Современные машины оцениваются по многим показателям, а предъявляемые к ним требования иногда оказываются противоречивыми. Стремление конструкторов удовлетворить этим требованиям приводит зачастую к тому, что затраты на проектирование машин неоправданно увеличиваются, а принятие неоптимальных решений на ранней стадии проектирования всё окупается в последствии. В связи с этим, актуальной задачей является создание теоретической основы проектирования системы автоматического регулирования / САР / комбинированного двигателя.

Задача исследования. Разработка методики оптимизационного проектирования САР комбинированного двигателя, учитывающей основные факторы эксплуатационных неустановившихся режимов работы:

1. Анализ основных причин нарушений рабочего процесса комбинированного двигателя на неустановившихся режимах работы, связанных с применением традиционных САРС безнаддувных дизелей

2. Выделение основных типов комбинированных двигателей и усло-



ий их работы, в которых необходимо применение системы автоматической коррекции / САК / топливоподачи по давлению наддувочного воздуха с целью согласования подач топлива и воздуха

3. Разработка общих принципов построения САК топливоподачи комбинированного двигателя по давлению наддувочного воздуха

4. Оценка и изменения динамических и экономических качеств комбинированного двигателя при введении САК топливоподачи

5. Выработка рекомендаций по выбору рациональной конструкции САК для быстроходных форсированных дизелей с турбонаддувом, оборудованных САРС прямого действия. Практическое решение задачи оптимального проектирования САР некоторых двигателей.

Общая методика. Поставленная задача решалась методами оптимального проектирования, которые включают ряд этапов:

1. Формирование и математическое описание цели оптимального проектирования в виде соответствующих критериев оптимальности

2. Выделение совокупности варьируемых в процессе оптимизации конструктивных параметров, определяющих основные характеристики комбинированного двигателя. Назначение области допустимых значений оптимизируемых параметров

3. Разработка математических моделей, т.е. описание математических соотношений, связывающих значения критериев оптимальности с оптимизируемыми параметрами, пригодных для использования на начальной стадии проектирования путем математического моделирования процессов с помощью ЭВМ

4. Поиск оптимального решения, оценка его точности, устойчивости и чувствительности.

Для того, чтобы вопрос выбора оптимальных параметров САР комбинированного двигателя оказался содержательным, требовалось формирование обоснованных критериев оптимальности и "просмотр" на этой основе пространства допустимого множества. Поэтому обоснованный выбор оптимальных параметров САР был принят лишь в процессе анализа паретовских моделей, что затруднялось практическим отсутствием математических моделей машинного агрегата с комбинированным двигателем, пригодных для использования на ранней стадии проектирования, и обоснованных критериев оптимальности. Проведен анализ связи некоторых параметров комбинированного двигателя и его САР с экономическими и динамическими показателями машинного агрегата, осуществлено выделение на основе этого анализа существенных ресурсов экономичности

и важнейших оптимизируемых параметров комбинированного двигателя и его САР, требующих учета при проектировании. Параллельно решается вопрос о введении в САР комбинированного двигателя новых элементов, которые учитывали бы особенности протекания рабочего процесса и работы турбокомпрессора на неустановившихся режимах.

Решение поставленной задачи является достаточно общим, допускающим обобщение накопленного опыта проектирования САР, и отражает основные конструктивные особенности комбинированного двигателя. Поэтому методика поиска оптимальных параметров САР была построена на знании характеристик комбинированного двигателя, оборудованного базовой системой автоматического регулирования скорости (САРС). Синтез новых элементов САР осуществляется на базе классификации и анализа влияния параметров САР на характеристики машинного агрегата с комбинированным двигателем.

Научная новизна работы состоит в том, что сформированы критерии оптимальности, характеризующие динамические и экономические свойства машинного агрегата с комбинированным двигателем, пригодные для использования уже на начальной стадии проектирования САР. На этой основе научно обоснованы и предложены новые способы и схемы регулирования комбинированного двигателя с учетом качества протекания рабочего процесса. Сформулирован и обоснован математический подход к синтезу нового элемента САР комбинированного двигателя — пневматического корректора, обеспечивающего согласование подачи топлива и воздуха в двигатель, повышающего качество рабочего процесса и экономичность его на неустановившихся режимах работы, снижающего токсичность и дымность выпускных газов и теплонпряженность. Приведена классификация САР комбинированных двигателей и методика статического и динамического расчета новых элементов САР на ранней стадии проектирования.

Практическая ценность работы состоит в обосновании критериев оптимальности динамических и экономических качеств САР комбинированных двигателей и создании на этой основе методики расчета системы автоматической коррекции подачи топлива комбинированного двигателя, доведения методики до стадии инженерного расчета для использования ее широким кругом проектировщиков САР комбинированных двигателей. Ценностью работы является также

разработка общих принципов построения двухимпульсных САР комбинированных двигателей и использование их при проектировании ряда новых автоматических регуляторов. В работе приведены практические рекомендации по выбору оптимальных параметров САР и передаточных механизмов.

Внедрение результатов работы произведено на объединении Челябинский тракторный завод им.В.И.Ленина путем передачи технической информации и прикладных программ ЕС ЭВМ, разработки и изготовления серии регуляторов переперспективных двигателей на основе авторских свидетельств, разработанных с участием автора.

На основании выполненных исследований сформулированы и обоснованы научные положения перспективного направления двигателестроения — двухимпульсного регулирования комбинированных двигателей по скорости и давлению наддувочного воздуха, осуществлено теоретическое обобщение научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение.

На защиту выносятся следующие вопросы:

1. Обоснование критериев оптимальности экономичности и быстродействия САР комбинированных двигателей
2. Математические модели элементов САР комбинированных двигателей, пригодные для использования на ранней стадии проектирования
3. Методика инженерного расчета САР комбинированного двигателя
4. Общие принципы формирования САР комбинированного двигателя с конкретными примерами создания регуляторов оптимальных параметров, защищенных авторскими свидетельствами.

Апробация. Основные положения работы были представлены на обсуждение на Всесоюзном научно-техническом семинаре по автоматическому регулированию теплоэнергетических установок МВТУ им.Н.Э.Баумана в период с 1967 по 1984 годы, а также на Отраслевом научно-техническом семинаре "Неуставившиеся режимы работы быстроходных двигателей внутреннего сгорания" (НАМИ, 1964г.), Научно-технической конференции "Пути улучшения технико-экономических показателей дизелей" (Харьков, 1969 г.); Всесоюзной научно-технической конференции "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении" (Москва, 1980 г.); Всесоюзной научной конференции "Рабочие процессы в двигателях внутреннего

сторания (МАДИ, 1982 г.) ; Всесоюзном научно-техническом семинаре по автоматическому регулированию теплоэнергетических установок (КАДИ, 1983 г.); Всесоюзном межотраслевом научно-техническом семинаре "Исследование двигателей сельскохозяйственных машин в динамических режимах" (Казань, 1983 г.)

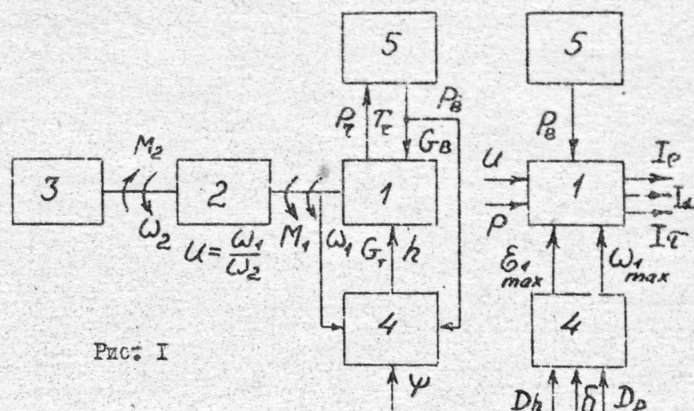


Рис. 1

Схема машинного агрегата с комбинированным двигателем;
1-дизель, 2,3-передаточный и исполнительный механизмы,
4-двухимпульсный регулятор, 5-турбокомпрессор

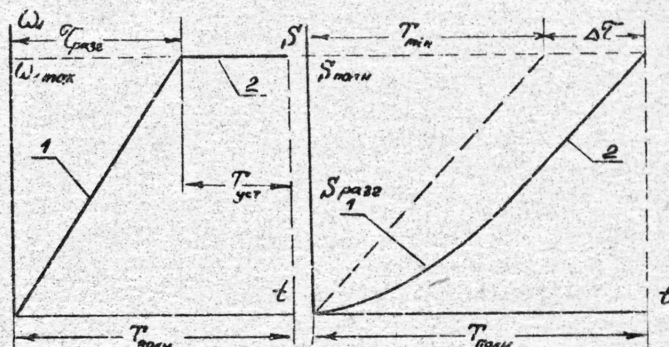


Рис. 2

Комбинированный цикл движения машинного агрегата с ДВС

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

КРИТЕРИИ ДИНАМИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ МАШИННОГО АГРЕГАТА С КОМБИНИРОВАННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Применение турбонаддува на дизелях объективно приводит к снижению динамических качеств двигателя, возникает закономерный вопрос — насколько снижение динамических качеств собственно двигателя сказывается на динамических показателях машинного агрегата.

Высокие экономические качества комбинированного двигателя на номинальном режиме работы часто не могут быть реализованы в условиях эксплуатации, так как спроектированный двигатель может быть использован в различных машинных агрегатах. Экономичность машинного агрегата может быть повышена путем улучшения экономичности комбинированного двигателя в зоне эксплуатационных режимов работы. Совмещение зоны экономической работы комбинированного двигателя с зоной эксплуатационных режимов машинного агрегата может быть выполнено выбором оптимальных параметров передаточного механизма и САР. Поэтому и возникает необходимость анализа экономических и динамических качеств машинного агрегата с комбинированным двигателем и разработка на этой основе обоснованных критериев оптимальности для использования при проектировании САР, определяющей эксплуатационные качества транспортного машинного агрегата с комбинированным двигателем.

Схема машинного агрегата с комбинированным двигателем изображена на рис. 1, где: 1 — дизель, ω_1 — скорость вращения коленчатого вала, M_1 — момент, J_1 — момент инерции; 2 — передаточный механизм, $u = \omega_1 / \omega_2$ — передаточное отношение; 3 — исполнительный механизм, ω_2 — скорость вращения вала, M_2 — момент, J_2 — момент инерции; 4 — автоматический регулятор скорости, настройка которого ψ определяет максимальную скорость вращения вала дизеля ω_{max} ; h — положение органа дозирования подачи топлива G_T ; 5 — турбокомпрессор, связанный с дизелем общим рабочим телом с параметрами: P_B , T_B — давление и температура во впускном трубопроводе, P_K , T_K — давление и температура в выпускном трубопроводе; ω_K — скорость вращения ротора турбокомпрессора, G_A — подача воздуха.

Простейшим приемом формирования критерия оптимальности

является выбор одной из функций, описывающих ускорение движения машинного агрегата. При выборе углового ускорения вала ϵ_2 исполнительного механизма в качестве критерия оптимальности оптимальное передаточное отношение $U_{\text{опт}}^{\epsilon}$ общеизвестно. Недостаток углового ускорения и времени разгона при использовании их в качестве критериев оптимальности заключается в том, что для большинства машинных агрегатов цикл движения состоит из разгона и установившегося режима, а параметры конечного установившегося режима и путь разгона не учитываются этими критериями. При заданном фиксированном перемещении $S_{\text{полн}}$ исполнительного органа использование указанных критериев может привести к выработке неверных рекомендаций по выбору оптимальных параметров, так как в комбинированном цикле разгона с последующим установившимся режимом снижение времени разгона не обязательно приводит к снижению времени полного цикла $T_{\text{полн}}$ на прохождение заданного расстояния. Для объяснения этого явления рассматривается комбинированный цикл движения рис. 2, состоящий из разгона и установившегося режима, при вариации передаточного отношения U . На рис. 3 представлены динамические показатели машинного агрегата, полученные при моделировании на ЦВМ:

$T_{\text{разг}}$ - время разгона двигателя, ϵ_1 - угловое ускорение коленчатого вала двигателя, ϵ_2 - угловое ускорение вала исполнительного механизма, $T_{\text{уст}}$ - время движения на установившемся режиме,

$$T_{\text{полн}} = T_{\text{разг}} + T_{\text{уст}} = T_{\text{мин}} + \Delta T \quad (I)$$

время полного движения на заданном перемещении в комбинированном цикле, $T_{\text{мин}}$ - минимальное время прохождения заданного перемещения вала исполнительного механизма с максимальной скоростью двигателя, ΔT - увеличение времени прохождения заданного перемещения по сравнению с безостановочным движением и максимальной скоростью двигателя.

Анализ динамических показателей показывает, что угловое ускорение вала исполнительного механизма ϵ_2 имеет максимум, когда половина момента двигателя затрачивается на ускорение его вала, а другая половина используется на валу исполнительного механизма, но этот максимум не соответствует минимуму времени движения $T_{\text{полн}}$ на заданном перемещении $S_{\text{полн}}$. Это явление объясняется тем, что изменение передаточного отношения U одновременно с изменением углового ускорения вала исполнительного

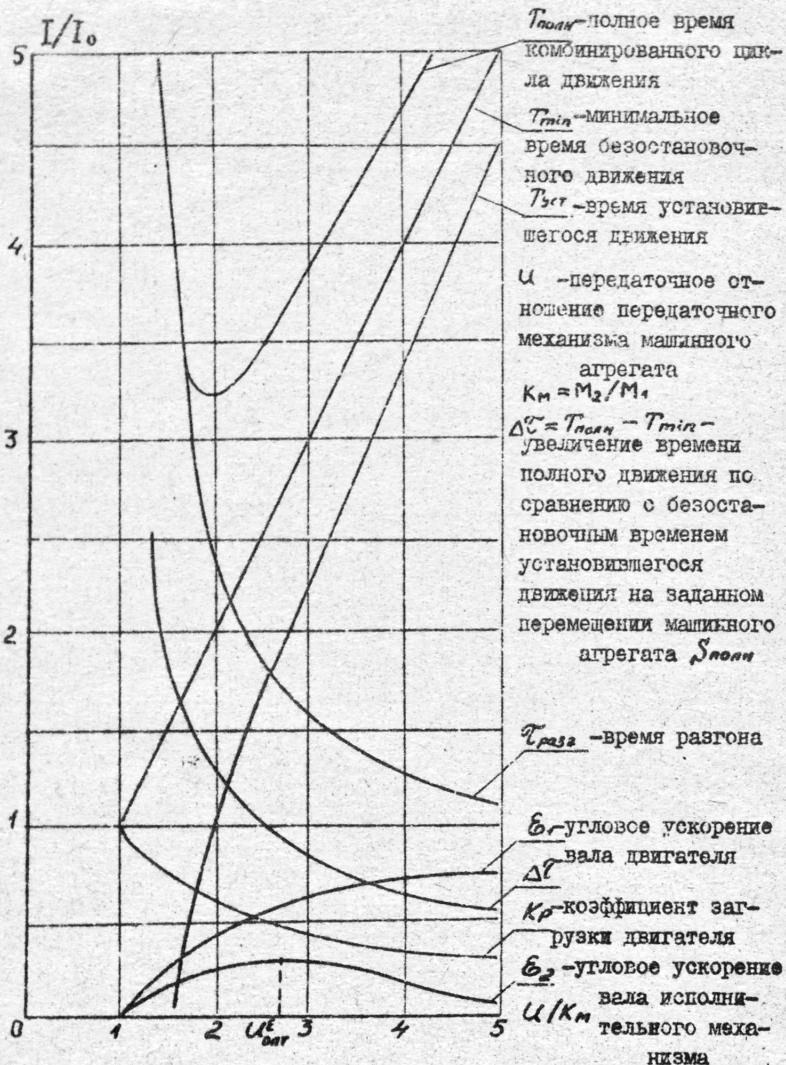


Рис. 3

Критерии оптимальности машинного агрегата с ДВС

механизма ϵ_2 приводит к изменению пути разгона $S_{раз}$ и времени прохождения оставшегося расстояния в установившемся режиме $T_{уст}$, соответствующем максимальной скорости двигателя. Увеличение передаточного отношения приводит к снижению времени разгона двигателя $T_{раз}$ до максимальной скорости и увеличению продолжительности установившегося режима $T_{уст}$, угловое ускорение вала двигателя ϵ_1 растет и достигает максимума при бесконечно большом передаточном отношении, соответствующем разгону двигателя без нагрузки, когда вся работа затрачивается на увеличение кинетической энергии машинного агрегата. Оптимальное передаточное отношение, соответствующее минимуму продолжительности комбинированного цикла, зависит от параметров САР, определяющих максимальную скорость вращения вала ω_{max} и максимальное ускорение вала дизеля

$$\omega_{опт} = \sqrt{\omega_{max}^2 \cdot \epsilon_{опт} / (\epsilon_{1max} \cdot S_{полн})}, \quad (2)$$

где $\epsilon_{1max} = M_1/J_1$ - максимальное ускорение вала дизеля при разгоне без нагрузки.

Поскольку оптимальное передаточное отношение определяется параметрами САР, то налицо и неоднозначное влияние параметров САР на динамические качества машинного агрегата, связанное с тем, что отклонение от оптимального передаточного отношения в любую сторону вызывает снижение динамических качеств машинного агрегата.

Влияние мощности двигателя на динамические качества машинного агрегата однозначно, увеличение запаса мощности двигателя по сравнению с необходимой для работы в установившемся режиме улучшает его динамические качества.

Таким образом, динамические свойства машинного агрегата в комбинированном цикле разгон - установившийся режим определяются не столько динамическими свойствами двигателя, сколько запасом его мощности и параметрами передаточного механизма. Последние оказывают значительное влияние и на экономические качества машинного агрегата.

В общепринятом смысле переходный процесс по критерию экономичности считается оптимальным при минимальной затрате энергии (расхода топлива) на разгон. На практике минимизация по этому функционалу в скрытом виде ведет не столько к экономичности расхода энергии, сколько к сокращению времени разгона.

Поэтому часто под экономичностью расхода энергии понимают коэффициент полезного действия машинного агрегата, то есть отношение полезной совершенной работы к общей затраченной энергии как на установившемся, так и на режиме разгона. При работе машинного агрегата в установившемся режиме работы подбор параметров передаточного механизма осуществляется из условия максимального значения эффективного КПД двигателя, который при постоянной скорости вращения его вала имеет экстремальную зависимость от отношения используемой мощности к номинальной (это отношение часто называется коэффициентом загрузки K_p). Анализируя характеристики комбинированного двигателя, можно установить, что максимальное значение КПД соответствует определенному соотношению мощности двигателя и скорости вращения его вала. Поэтому выбор двигателя с запасом мощности, значительно превышающей потребности машинного агрегата на установившемся режиме работы, хотя и приводит к улучшению динамических качеств, но ухудшает экономичность его и увеличивает расход топлива по сравнению с двигателем оптимальной мощности при заданной скорости вращения.

Таким образом, экономичность машинного агрегата определяется не только эффективным КПД двигателя на номинальном режиме работы, но и его коэффициентом загрузки в эксплуатационных условиях. Повышение экономичности может быть достигнуто выбором оптимального передаточного отношения передаточного механизма машинного агрегата по критерию коэффициента загрузки K_p двигателя (рис.3). В настоящее время предпринимаются попытки оснащения некоторых машинных агрегатов устройствами для контроля параметров работы двигателя внутреннего сгорания и коэффициента загрузки его с целью улучшения эксплуатационной экономичности. Управление двигателем при этом часто возлагается на водителя, в то время как для этой функции может быть использован и САР двигателя.

Анализ комбинированного цикла работы машинного агрегата показывает, что временное дефорсирование комбинированного двигателя путем корректирования подачи топлива при некотором снижении динамических качеств машинного агрегата приводит к повышению экономических качеств его. Поэтому корректирование подачи топлива комбинированного двигателя на неуставившихся режимах работы является эффективным приемом повышения эксплу-

этакционной эаономичности машинного агрегата.

КРИТЕРИИ ДИНАМИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ КОМБИНИРОВАННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Индикаторные показатели двигателя характеризуют действительный рабочий цикл и качество рабочего процесса, для оценки эаономичности двигателя интерес представляют индикаторный КПД η_i , который учитывает не только потери тепла, но и потери, определяемые неполнотой сгорания. η_i зависит от различных конструктивных и регулировочных параметров, но в процессе работы они, как правило, остаются неизменными. Поэтому основное влияние на индикаторные показатели комбинированного двигателя при работе на неустановившихся режимах оказывают закон подачи топлива и воздушно-топливное соотношение при сгорании. В дизелях с турбонаддувом зависимость индикаторных показателей от воздушно-топливного соотношения проявляется через влияние его на скорость сгорания, поэтому η_i увеличивается с ростом воздушно-топливного соотношения.

Динамические и эаономические качества комбинированного двигателя в значительной степени определяются характеристиками системы автоматической коррекции подачи топлива (САК) по давлению наддувочного воздуха, определяющему подачу воздуха в дизель и воздушно-топливное соотношение. Как внутренний параметр комбинированного двигателя воздушно-топливное соотношение может быть вырежено путем решения уравнений движения элементов САК, но в этом случае применение их ограничивается только малыми отклонениями от равновесного режима для анализа устойчивости. Изменение воздушно-топливного соотношения, справедливое при более значительных отклонениях от равновесного режима, предполагает использование нелинейизованного уравнения в виде

$$\Delta \alpha / \alpha_0 = (K_B - K_T) / (K_T + 1), \quad (3)$$

где α_0, α - значения воздушно-топливного соотношения на равновесном режиме и его текущее значение,

$\Delta \alpha = \alpha - \alpha_0$ - изменение воздушно-топливного соотношения,

K_T, K_B - относительные изменения подач топлива и воздуха.

Изменение воздушно-топливного соотношения комбинированного двигателя на неустановившихся режимах работы при прочих равных условиях определяется постоянными времени турбокомпрессора T_T , дизеля T_d , регулятора скорости T_k и степени

неравномерности регулирования **Б**.

Наиболее значительное снижение воздушно-топливного соотношения комбинированного двигателя происходит при разгоне перемещением рычага управления за счет инерции ротора турбокомпрессора. Моделирование этого процесса на ЦВМ показало, что возможности изменения параметров САРС с целью минимизации снижения воздушно-топливного соотношения практически исчерпаны. Поэтому мерами, которые могут повысить воздушно-топливное соотношение на неустановившихся режимах работы, является введение в САР дизеля с турбонаддувом второго импульса, корректирующего подачу топлива или перераспределение энергии между поршневой частью двигателя и турбокомпрессором. Импульсы, отражающим количество поступающего в двигатель воздуха может служить давление наддувочного воздуха P_B ; использование его удобно тем, что конструкция чувствительного элемента давления достаточно проста и не требуется проводить конструктивных изменений дизеля и турбокомпрессора. Вместе с количеством поступающего в двигатель топлива, пропорционального перемещению органа дозирования топливopодачи, давление наддувочного воздуха полностью определяет воздушно-топливное соотношение. Поэтому введение в автоматический регулятор скорости, меняющего положение органа дозирования топливopодачи в зависимости от скорости вращения вала дизеля и не учитывающего параметры работы другого равноценного динамического элемента - турбокомпрессора, импульса давления наддувочного воздуха, вызывается необходимостью улучшения качества рабочего процесса комбинированного двигателя на неустановившихся режимах работы. Исторически внедрение турбонаддува на дизелях не сопровождалось изменением его САР, это было оправданным при низких давлениях наддувочного воздуха, когда характеристики турбокомпрессора мало оказывались на характеристиках комбинированного двигателя. С ростом давления наддувочного воздуха степень влияния турбокомпрессора на характеристики комбинированного двигателя возрастет. Сохранение на комбинированном двигателе САР, идентичной безнаддувной машине, приводит к тому, что изменение подачи топлива от минимальной до максимальной осуществляется независимо от давления наддувочного воздуха, меняющегося в достаточно широких пределах от давления на холостом ходу $P_{B_{хл}}$ до номинального $P_{B_{ном}}$. Поэтому разгон комбинированного двигателя осуществляется при подаче максимального количества топлива

и низком давлении наддувочного воздуха, определяя снижение воздушно-топливного соотношения до величины

$$\lambda_{\min} = \lambda_{\text{ном}} / \left(\frac{\partial g_{\text{вкл}}}{\partial P_{\text{в}}} \frac{P_{\text{в ном}} - P_{\text{в кк}}}{g_{\text{в кк}}} + 1 \right) \quad (4)$$

Сохранение на комбинированном двигателе САР безнаддувной машины целесообразно только при условии достаточного запаса воздушно-топливного соотношения на номинальном режиме $\lambda_{\text{ном}}$ или исходном режиме холостого хода $\lambda_{\text{хх}}$

$$\lambda_{\text{хх}} \geq \lambda_{\min \text{ог}} (K_{\text{т max}} + 1) \quad (5), \quad \lambda_{\text{ном}} \geq \lambda_{\min \text{ог}} (K_{\text{в max}} + 1) \quad (6)$$

где $\lambda_{\min \text{ог}}$ — минимально-допустимое воздушно-топливное соотношение из условий качества протекания рабочего процесса комбинированного двигателя.

Изменение динамических качеств комбинированного двигателя при корректировании подачи топлива по давлению наддувочного воздуха оценивалось по идеализированному переходному процессу рис. 4 критериями:

$I_{\tau} = \Delta \tau / \tau_{\text{разг}}$ — увеличения времени разгона без нагрузки,

$I_{\tau}^* = \tau_{\text{кор}} / \tau_{\text{разг}}$ — относительной продолжительности коррекции,

$I_{\varepsilon} = \Delta \varepsilon_i / \varepsilon_{i \text{ max}}$ — степени снижения ускорения разгона,

$I_{\omega} = \frac{(\omega_i - \omega_i^*) \tau_{\text{кор}}}{\Delta \omega_i \text{ max}}$ — отставания скорости вращения дизеля при корректировании подачи топлива ω_i^* по сравнению с процессом без коррекции ω_i .

С целью облегчения использования критериев I_{τ} , I_{ε} , I_{ω} комбинированных двигателей им придан безразмерный нормированный вид и с помощью моделирования на ЦМ построены их зависимости (рис. 5, 6 и др.) от безразмерных оптимизируемых параметров:

$D_{\delta} = \Delta g_{\text{кор}} / \Delta g_{\text{т max}}$ — диапазон корректирования по подаче топлива, контролируемой пневматическим корректором $\Delta g_{\text{т кор}}$ по отношению к максимальному изменению топливоподачи $\Delta g_{\text{т max}}$, управляемой регулятором скорости;

$D_P = \Delta P_{\text{в кор}} / \Delta P_{\text{в max}}$ — диапазона работы пневмокоректора, отношения разности $\Delta P_{\text{в кор}}$ давлений в начале $P_{\text{в к}}$ и конце $P_{\text{в кк}}$ работы корректора к максимальному изменению давления наддувочного воздуха $\Delta P_{\text{в max}}$.

В качестве критериев экономичности комбинированного двигателя при расчете на ЦМ принималось: отношение средних значений эффективного КПД в процессе разгона с корректированием $\Delta \eta_e^*$

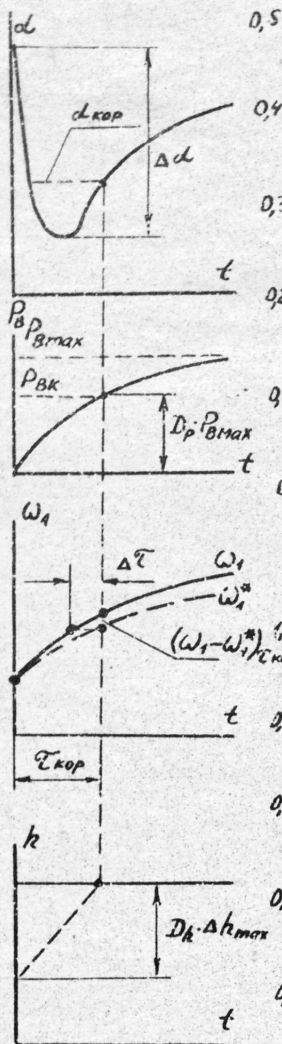


Рис. 4

Идеализированный процесс разгона дизеля с турбонаддувом

14

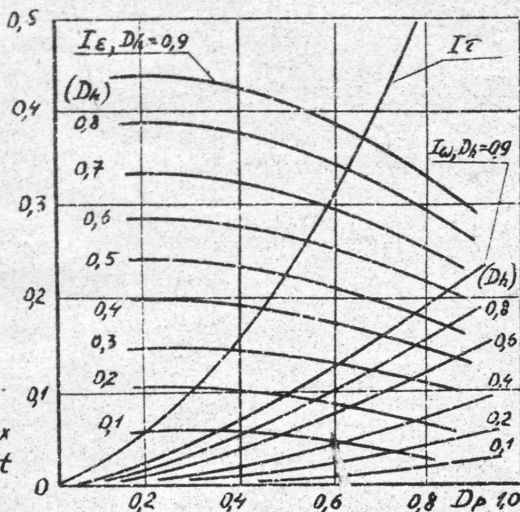


Рис. 5. Зависимость критериев оптимальности от диапазона работы пневмокорректора D_p

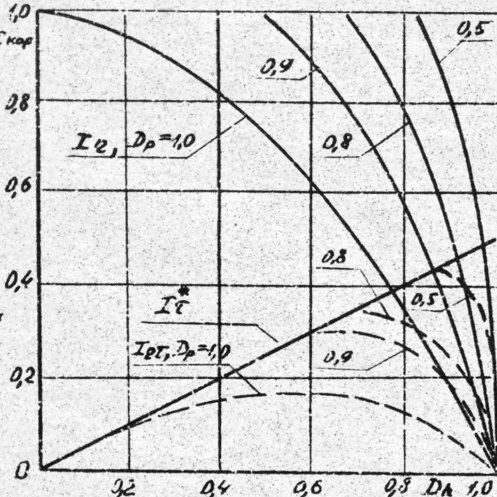


Рис. 6. Зависимость критериев оптимальности от диапазона коррекции D_k

и без коррекции $\Delta \varrho_e$

$$I_p = \frac{\Delta \varrho_e^*}{\Delta \varrho_e} \approx \frac{\int_0^{T_{кор}} \Delta \varrho_{cp}^* dt}{\int_0^{T_{кор}} \Delta \varrho dt} = I_{\Delta}, \quad (7)$$

оценка по которому за время корректирования $T_{кор}$ совпадала со средними снижениями воздушно-топливного соотношения;

$I_{pr}^* = I_p \cdot I_r^*$ — комплексный критерий.

Результаты моделирования критериев экономичности на ЦВМ показаны на рис. 6, анализ их показывает, что более глубокое влияние на экономичность и быстродействие комбинированного двигателя оказывает диапазон корректирования подачи топлива D_h , показывающий, какая доля максимально возможной подачи топлива контролируется пневматическим корректором.

Критерии экономических и динамических качеств машинного агрегата и комбинированного двигателя оказались, таким образом, связанными между собой, что позволяет по результатам их моделирования на ЦВМ произвести выбор оптимальных параметров пневматического корректора и регулятора скорости с учетом функциональных ограничений на элементы САР по устойчивости, управляемости, нечувствительности, допустимого снижения воздушно-топливного соотношения по дымности и токсичности выпускных газов комбинированного двигателя.

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМБИНИРОВАННОГО ДВИГАТЕЛЯ, ОБОРУДОВАННОГО СИСТЕМОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ПОДАЧИ ТОПЛИВА ПО ДАВЛЕНИЮ НАДВУЧНОГО ВОЗДУХА

Согласование подачи топлива и воздуха в двигатель, независимо от конструкции пневматического корректора, осуществляется введением в САРС положительной обратной связи по давлению наддувочного воздуха путем суммирования импульсов чувствительных элементов скорости вращения вала дизеля и давления наддувочного воздуха таким образом, что перемещение органа дозирования топливоподачи

$$\Delta h \approx k_2 \Delta \dot{z}_n + k_1 \Delta \dot{z}_u, \quad (8)$$

где k_1, k_2 — геометрические коэффициенты усиления по первому и второму импульсам,

$\Delta \dot{z}_n, \Delta \dot{z}_u$ — перемещения муфт пневматического и механического

чувствительных элементов.

При выводе дифференциального уравнения двухимпульсной САР было отмечено, что введение корректирующего импульса приводит к изменению коэффициентов уравнения при производных не выше первой, что свидетельствует о возможности значительного изменения статических характеристик, в первую очередь степени неравномерности регулирования скорости по сравнению с базовой одноимпульсной САР δ_I

$$\delta_{II} = \delta_I (1 - D_h) \quad (9)$$

являясь до снижения ее до нуля.

В отличие от равновесной характеристики одноимпульсной САР, равновесная двухимпульсная характеристика не может быть построена без знания характеристики системы наддува двигателя. Это является существенным недостатком двухимпульсного регулятора, затрудняющим использование его на двигателе с другими характеристиками и настройку в условиях поточного производства. Анализ коэффициентов дифференциального уравнения двухимпульсной САР показал, что этот недостаток может быть устранен применением суммирующих механизмов с переменными передаточными отношениями (коэффициентами K_1 и K_2 в уравнении 8) по зависимости

$$K_1 / K_{1max} \approx 1 - D_h. \quad (10)$$

В системах автоматического управления объект считается управляемым, когда вектор состояния его можно менять требуемым образом путем соответствующего изменения вектора управления. В САР ДВС понятие управляемости часто заменяется термином "всерожности работы", понимая под ней возможность настройки на любой желаемый режим работы двигателя.

Режим работы двухимпульсной САР определяется заданием двух параметров W_1 и P_2 , при критическом сочетании коэффициентов усиления по первому K_1 и второму K_2 импульсам перемещение органа дозирования Δh может быть самопроизвольным или отсутствовать при изменении настройки за счет компенсации действия одного импульса другим, что может быть охарактеризовано как потеря управляемости САР. Анализ показал, что эти критические значения коэффициентов K_1 и K_2 определяются отношениями усилий K_c , развиваемых чувствительными эле-

ментами давления и скорости, что связано с зависимостью равно-
весной двухимпульсовой характеристики от параметров системы
наддува $\frac{\partial P_2}{\partial \omega_1}$, $\frac{\partial P_2}{\partial n}$.

При критических ситуациях, в случае выхода из строя систе-
мы автоматической коррекции (САК), происходит увеличение скоро-
сти вращения вала дизеля на холостом ходу, которое может быть
заранее ограничено допустимой величиной путем увеличения хода
муфты чувствительного элемента скорости.

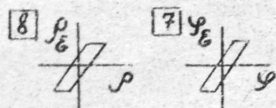
Новым явлением, несвойственным одноимпульсным САР, являет-
ся возможность появления значительной нечувствительности двух-
импульсной САР по скорости, зависящей от характеристике систе-
мы наддува $\frac{\partial P_2}{\partial \omega_1}$. При неблагоприятном сочетании коэффициентов
усиления по первому и второму импульсам K_1 и K_2 нечувстви-
тельность базовой одноимпульсной САР многократно увеличивается.
Это явление объясняется тем, что при изменении скорости вращения
вала дизеля меняются одновременно поддерживающие силы обоих
чувствительных элементов, но вызывают они перемещения органа
дозирования топливоподачи в разные стороны, т.е. могут компен-
сировать друг друга.

М4322331
Нечувствительность двухимпульсного регулятора проявляется
и по второму импульсу - давлению наддувочного воздуха, но меха-
низм ее образования имеет другой характер, не связанный с ком-
пенсацией приведенных движущих сил двух чувствительных элемен-
тов, как при рассмотрении нечувствительности по основному им-
пульсу скорости. Поэтому при проектировании САР необходимо учи-
тывать критические значения коэффициентов усиления K_1 и K_2
по нечувствительности и управляемости в качестве функциональных
ограничений.

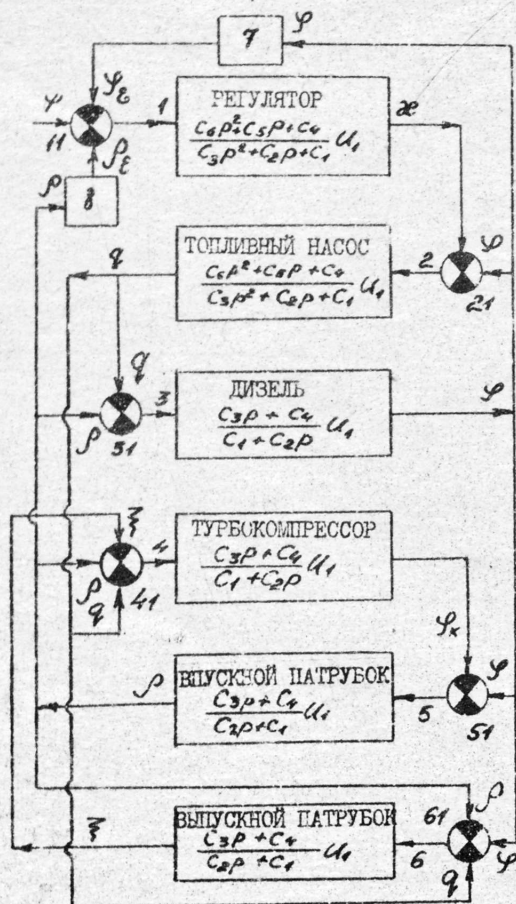
Анализ устойчивости двухимпульсной САР был проведен по ее
дифференциальному уравнению, учитывая, что базовая одноимпульс-
ная САРС заведомо устойчива, а введение корректирующего импуль-
са приводит к снижению запаса устойчивости, были выявлены
границы устойчивости двухимпульсной САР и условия сохранения
устойчивости при обеспечении астатической характеристики.

В некоторых областях работы двухимпульсной САР регулятор
скорости выключается из работы и комбинированный двигатель бу-
дет охвачен только положительной обратной связью по давлению
наддувочного воздуха (так называемая корректорная характери-
стика). В этой области устойчивая работа возможна за счет зна-





Нелинейные блоки моделирования МОДС типа "люфт" [3]



Безразмерные
изменения:

y, y_k - скорости валов
двигателя и
турбокомпрессора

q, x - подачи топлива
и координаты
органа дози-
рования

p - давления газов
и наддувочного
воздуха

C_i - параметры типовых
блоков МОДС

y_E, p_E - безразмерные
изменения
скорости вала
двигателя и
давления над-
дувочного воз-
духа в пределах
нечувствитель-
ности

Рис. 7

Структурная схема моделирования
двухимпульсной САР комбинированного
двигателя внутреннего сгорания

чительного самовиравливания двигателя. Даже при неустойчивости САК в этой области двигатель не может пойти в равновесие, так как его максимальная скорость ограничена регулятором скорости. Двухимпульсная САР может оказаться непригодной из-за потери устойчивости, а по причине неустойчивости характеристики и автоколебаниям при приближении к границе устойчивости.

Охват зоны нечувствительности положительной обратной связью может привести к образованию кетлевой характеристики, способствующей возникновению автоколебаний, поэтому выключение регулятора скорости из работы и переход на корректорную характеристику может привести к неустойчивой работе. Таким образом, система может находиться в непрерывных колебаниях, переходя от неустойчивого положения к устойчивому за счет отключения и подключения регулятора скорости. Моделирование этих колебаний, которые вызываются не внешним источником, а внутренними свойствами двухимпульсной САР, производилось с помощью системы МОДС (моделирования и оптимизации динамических систем, разработанной в МВТУ им. Н.Э. Баумана). Структурная схема моделирования на ЕС ЭВМ, показанная на рис. 7, построена с учетом динамических характеристик двухимпульсного регулятора I и его нечувствительности входных параметров φ_e, p_e - безразмерных изменений скорости коленчатого вала и давления наддувочного воздуха, топливного насоса 2 (α - безразмерное изменение положения органа подачи топлива, q - безразмерное изменение подачи топлива), 3 собственно дизеля, турбокомпрессора 4 (φ_r, ξ - безразмерное изменение скорости ротора и давления газов), впускного 5 и выпускного 6 патрубков.

СИНТЕЗ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО КРИТЕРИЯМ ЭКОНОМИЧНОСТИ И БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Введение в САРС корректирующего импульса по давлению наддувочного воздуха приводит к столь значительному изменению ее динамических и статических характеристик, что делает невозможным использование при проектировании установившихся методов расчета одноимпульсной САР.

В качестве основного оптимизируемого параметра при синтезе выбирается диапазон корректирования топливоподачи D_h , характеризующий долю подачи топлива, контролируемую пневматическим

корректор. Такой выбор позволяет выработать общие рекомендации для выбора оптимальных параметров САР широкого класса комбинированных двигателей.

Критерии оптимальности машинного агрегата и комбинированного двигателя требуют согласования между собой для выбора оптимальных параметров, по которым возможно проведение дальнейших расчетов элементов САР комбинированного двигателя.

Структурная схема взаимодействия критериев оптимальности при проектировании САР комбинированного двигателя показана на рис. 1 рядом с функциональной схемой.

Входными параметрами синтеза двухимпульсного регулятора являются параметры: δ — степень неравномерности регулирования скорости вращения вала дизеля, $\omega_{\text{так}}$ — максимальная скорость, $\Delta h_{\text{так}}$ — максимальное перемещение органа дозирования топливopодачи. Эти параметры являются достаточными для проектирования регулятора скорости комбинированного двигателя. Динамика корректирования топливopодачи по перемещению органа дозирования Dh и давления наддувочного воздуха Dp определяются методами оптимизации по наилучшим условиям работы САР в режиме разгона дизеля, что позволяет совместно с входными параметрами синтеза рассчитать конструктивные размеры двухимпульсного регулятора по методике статического расчета. Оценка достижения оптимальных параметров двухимпульсного регулятора производится на первом этапе проектирования по критериям экономичности $I_{\text{г}}$ и быстродействия $I_{\text{г}}$ комбинированного двигателя с ограничениями по воздушно-топливному соотношению $\lambda_{\text{min,ог}}$ в зависимости от давления наддувочного воздуха $P_{\text{в}}$, управляемости, нечувствительности и устойчивости. При использовании критериев оптимальности машинного агрегата оптимизируемыми параметрами могут быть мощность двигателя $P_{\text{ном}}$ и передаточное отношение u .

Естественно, что процесс синтеза не может быть закончен после первого приближенного этапа и для выбора оптимальных параметров должен быть повторен несколько раз, исследуя окрестности оптимального решения на устойчивость и чувствительность оптимального проекта к ограничениям и входным параметрам синтеза. Основной вывод, который следует сделать из рассмотрения взаимосвязи критериев оптимальности комбинированного двигателя и машинного агрегата — это более низкое положение критериев

оптимальности двигателя, наблюдавшееся в практике проектирования, по отношению к критериям машинного агрегата. Часто предъявляются завышенные требования со стороны потребителей к динамическим характеристикам двигателя, т.е. требования к динамическим качествам двигателя. Трудность выбора оптимального диапазона корректирования топливopодачи D_k заключается в противоречивости критериев I_p, I_t , в практическом отсутствии достоверных требований к САР со стороны потребителей и конструкторов двигателей, в недостатке опыта конструирования и эксплуатации двухимпульсных САР. Поэтому применение классических методов оптимизации в условиях ограниченности информации становится затруднительным, потребовалась разработка новых методов.

Рациональным путем решения многокритериальной задачи является ранжирование частных критериев оптимальности и последовательный их учет с назначением допустимого отклонения от минимального значения Δ_i . Перспективным путем решения является также формирование обобщенного критерия оптимальности в виде линейной комбинации частных критериев I_i с назначением весовых коэффициентов C_i .

Практически полное отсутствие статистических данных по выбору весовых коэффициентов и допустимых отклонений критериев экономичности и быстродействия комбинированного двигателя затрудняет непосредственное применение обоих методов при выборе оптимальных параметров системы автоматической коррекции. Поэтому в работе использовался комбинированный метод формирования обобщенного критерия I_o в виде (рис.8)

$$I_o = \sum C_i I_i = I_{o \min} + \Delta_o \quad (II)$$

с вариацией весовых коэффициентов C_i и анализом их влияния на отклонение от минимального значения обобщенного критерия Δ_o .

При значении диапазона корректирования топливopодачи $D_k \approx 0,8$ отмечается значение обобщенного критерия I_o , отличающееся от минимального нулевого на ошибку $\Delta_o = 40\%$, независимо от выбора весовых коэффициентов. Представленное на рис.9 достижимое множество позволяет оценить какой ценой может быть достигнуто улучшение двухимпульсной САР по показателям динамичности и экономичности комбинированного двигателя. Влияние допустимого отклонения от минимального значения на устойчивость

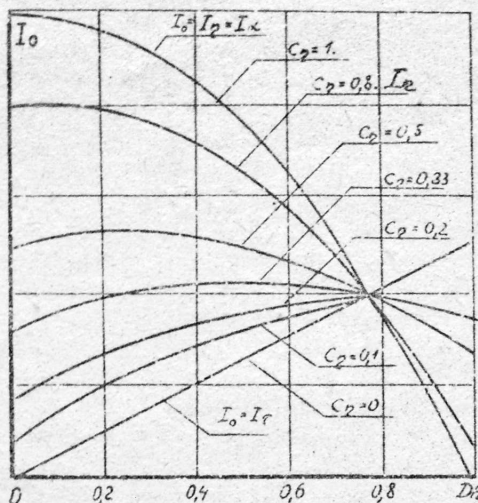


Рис. 8 Достижимое множество

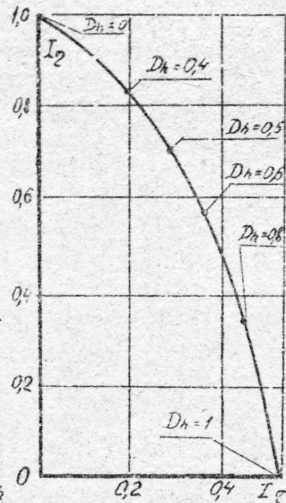


Рис. 9

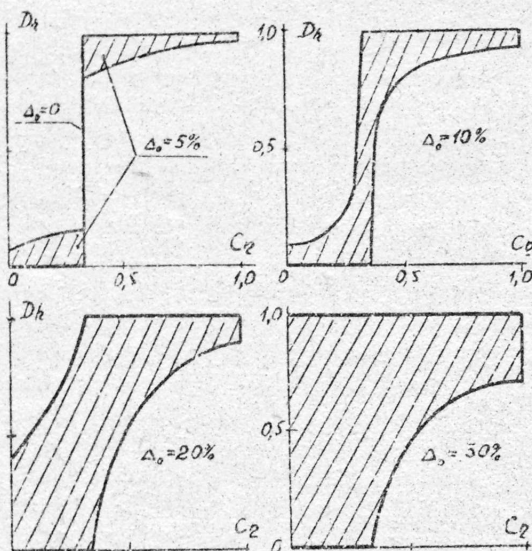


Рис. 10 Допустимое множество

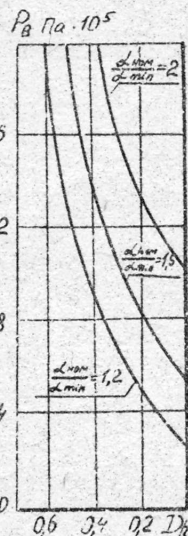


Рис. 11

оптимального решения при вариации весовых коэффициентов было проанализировано с помощью расчетов на ЦВМ. Как показано на рис. 10, снижение Δ_a приводит к необходимости учета экспертных оценок и при $\Delta_a = 5\%$ область оптимальных значений диапазона корректирования становится разрывной, резко переходя от значений $D_k = 0$ к $D_k = 1$, что говорит о неустойчивости оптимального решения и практической трудности выработки рекомендаций выбора оптимального диапазона корректирования при отклонении от минимального значения критерия менее 5-10%. Допустимое множество оптимальных значений диапазона корректирования показано на рис. 10 заштрихованной областью с границами, определяемыми допустимыми отклонениями обобщенного критерия оптимальности, т.е. точностью решения.

Основываясь на характеристиках дизеля 64Н 15/18 с турбокомпрессором ТКР-14 в МВТУ им. Н.Э. Баумана были выполнены и испытаны двухимпульсные САР с диапазонами корректирования $D_k = 0,2 \div 1,0$. Испытания подтвердили основные допущения при расчете и показали, что выбор диапазона корректирования необходимо производить с учетом степени форсирования по давлению наддувочного воздуха, с ростом номинального давления наддувочного воздуха и снижением номинального воздушно-топливного соотношения необходимо увеличивать диапазон корректирования топливopодачи D_k .

Для комбинированных двигателей, оснащенных автономной системой охлаждения наддувочного воздуха, минимально допустимое значение диапазона корректирования, рассчитанное по уравнению состояния, связано с запасом воздушно-топливного соотношения на номинальном режиме и режиме холостого хода (5,6) номинальным давлением наддувочного воздуха зависимостью, показанной на рис. 11.

После выбора оптимальных параметров САР производится расчет отдельных элементов, обеспечивающий реализацию выбранных оптимальных параметров.

Расчет пневматического корректора сводится к выбору эффективной площади мембраны F_n и коэффициента жесткости пружины C_2 с целью обеспечения постоянного значения воздушно-топливного соотношения при корректировании подачи топлива по давлению наддувочного воздуха $\alpha_{кор} = const$

$$\frac{F_M}{C_2} = \frac{\partial g_{вч}}{\partial p_B} // \left(\frac{\partial g_{тч}}{\partial h} L_0 L_0 K_2 \right), \quad (12)$$

где $\frac{\partial g_{тч}}{\partial h}$, $\frac{\partial g_{вч}}{\partial p_B}$ — частные производные зависимостей цикловых подач топлива и воздуха в двигатель по перемещению органа дозирования топливopодачи и давлению наддувочного воздуха, L_0 — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива.

Максимальное перемещение муфты пневмокpектoра $\Delta Z_{пmax}$ определяется коэффициентом усиления передаточного механизма K_2 по второму импульсу и Δh_{max} — ходом органа дозирования топливopодачи. Максимальное перемещение муфты регулятора скорости должно обеспечивать выключение подачи топлива независимо от давления наддувочного воздуха и положения муфты пневмокpектoра при возможном заклинивании его. Расчет закона изменения коэффициента усиления передаточного механизма регулятора по первому импульсу производится по заданной степени неравномерности регулирования скорости, расчет механического чувствительного элемента следует проводить по общепринятой методике.

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ И КОМПОНОВКА ДВУХИМПУЛЬСНОГО РЕГУЛЯТОРА

Транспортные дизели, работающие в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов, часто оснащаются всережимными регуляторами скорости прямого действия, встроенными в блочный топливный насос. Двухимпульсный регулятор прямого действия представляет комбинацию чувствительных элементов скорости вращения вала дизеля и давления наддувочного воздуха, соединенных суммирующим механизмом с органом дозирования топливopодачи. Без учета наличия регулировок, позволяющих менять заданное значение регулируемой скорости, диапазон изменения топливopодачи по перемещению органа дозирования и давлению наддувочного воздуха, заданное значение воздушнс-топливного соотношения номинальной мощности, а также некоторых других настроек, орган дозирования должен занимать определенное положение при различных комбинациях скорости вращения вала и давления наддувочного воздуха. При "силовом" суммировании импульсов это обеспечивается при степени податливости суммирующего механизма, равной единице, так

как перемещение органа дозирования топливоподачи производится непосредственно под действием разности сил пневматического и механического чувствительных элементов и органа изменения настройки. При кинематическом суммировании импульсов усилия чувствительных элементов не передаются на суммирующий механизм и орган дозирования, по этой причине суммирующий механизм должен иметь как минимум две степени подвижности, обеспечивая перемещение органа дозирования под действием перемещений двух независимых функционирующих чувствительных элементов. Компоновка пневмокорректора возможна на базе одноимпульсного регулятора скорости с наименьшими изменениями при применении кинематического суммирования импульсов. Плоский суммирующий механизм с двумя степенями свободы монтируется между органом дозирования и чувствительными элементами, структура его не сказывается на характеристиках комбинированного двигателя, но в значительной степени предопределяет технологичность и надежность конструкции регулятора, удобство обслуживания и регулировок. Изменение передаточного отношения осуществляется с помощью ползунов на рычагах или кулисах, проектирование шарнирно-рычажного механизма ведется общепринятыми методами геометро-кинематического синтеза.

Увеличение подачи топлива при пуске двигателя может производиться путем отключения пневмокорректора или специальным устройством регулятора, применение его надо считать предпочтительным при использовании пневмокорректора, ограничивающего подачу топлива в период пуска двигателя.

Важные функции в двухимпульсном регуляторе выполняют упоры пневматического и механического чувствительных элементов, положение которых определяет соотношение максимальных подач топлива, контролируемых пневмокорректором и регулятором скорости, т.е. диапазон корректирования топливоподачи, а, следовательно, и воздушно-топливное соотношение на неустановившихся режимах работы. Эти упоры обычно выполняют функции регулировочных устройств, позволяющих производить настройку регулятора на заданные параметры.

Одной из первых конструкций двухимпульсных регуляторов [1] является передвижной упор органа дозирования топливоподачи, ограничивающий максимальную подачу топлива в зависимости от давления наддувочного воздуха. Требования снижения рабо-

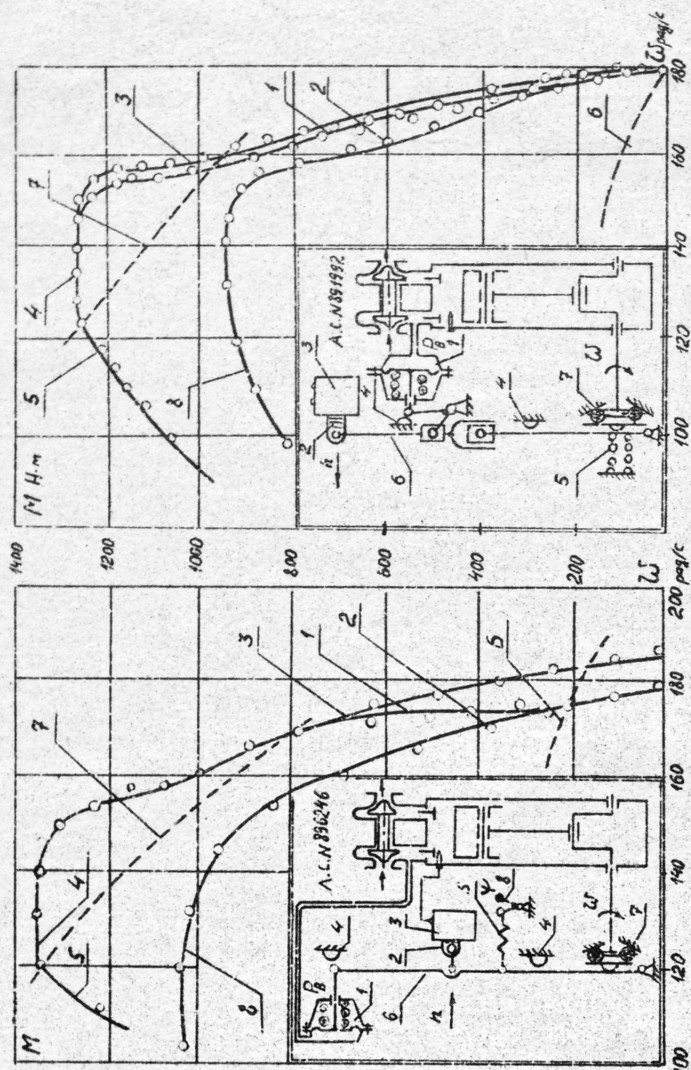


Рис. 12, 13. Статические характеристики дизеля 6ЧН 15/18, оборудованного системой автоматической коррекции подачи топлива по давлению наддувочного воздуха P_8

ритных размеров пневмокорректора, обеспечения увеличения подачи топлива при запуске и некоторые другие привели к появлению регуляторов с "кинематическим" суммированием импульсов, примерами которых могут служить регуляторы дизеля 64Н I5/I8, разработанные в МВТУ им. Н.Э.Баумана (рис. I2, I3):

1 - пневматический корректор, 2- орган дозирования топливоподачи, 3-топливный насос, 4-упоры, 5-пружина, 6- суммирующий рычаг, 7-центробежный чувствительный элемент скорости, 8 - рычаг управления.

Регуляторы работают следующим образом: пневматический чувствительный элемент воздействует на суммирующий рычаг и осуществляет увеличение подачи топлива при росте давления наддувочного воздуха, центробежный чувствительный элемент перемещает суммирующий рычаг и орган дозирования топливоподачи в сторону увеличения подачи при снижении скоростного режима.

Суммирование импульсов в регуляторе на рис. I2 осуществляется с постоянным коэффициентом усиления K_1 , на рис. I3 с переменным по зависимости (I0) коэффициентом усиления. Незначительное изменение конструкции суммирующего рычага привело к значительному изменению статических характеристик САР (рис. I2, I3): 1 - двухимпульсная регуляторная характеристика, 2- одноимпульсная регуляторная характеристика при отключении импульса (давления наддувочного воздуха), 3 - одноимпульсная регуляторная характеристика при фиксировании муфты пневматического чувствительного элемента в положении максимального давления, 4 - внешняя характеристика дизеля, 5- корректорная характеристика (при отключении импульса скорости), 6-7 - границы начала и конца работы пневмокорректора по давлению наддувочного воздуха, 8 - частичная скоростная характеристика при отключении пневмокорректора.

Изменение коэффициента усиления с изменением давления P_2 наддувочного воздуха привело к обеспечению постоянства степени неравномерности регулирования скорости при изменении давления в зоне корректирования топливоподачи, отключении пневмокорректора в некоторых других условиях, что позволяет использовать без изменения разработанную конструкцию и на других двигателях и производить настройку регулятора на безмоторных стендах в условиях серийного производства. Динамические характеристики САР с регуляторами разной глубины корректирования $D_n = 0,25$ практи-

чески одинаковы.

ВЫВОДЫ

На основании моделирования на ЦВМ процессов в комбинированном двигателе внутреннего сгорания, подтвержденных экспериментальными исследованиями, получены результаты, которые сводятся к следующим основным выводам и рекомендациям:

1. Анализ общих свойств машинного агрегата с ДВС показал существование 2-х возможных областей работы с существенно различными экономическими показателями при практически одинаковых динамических. Положение этих областей в значительной степени определяется параметрами САР дизеля, заложенными при проектировании ее.

2. Сформулированные критерии оптимальности отражают свойства машинного агрегата с ДВС в комбинированном цикле работы разгон - установившийся режим. Получаемые по разработанным критериям оптимальные значения оптимизируемых параметров учитывают в общем виде характеристики САР комбинированного двигателя, с их помощью выявлено влияние ограничения максимальной скорости двигателя на оптимальное передаточное отношение.

3. На базе методов оптимального проектирования сформулирован и обоснован математический подход проектирования систем автоматического управления подачи топлива, направленных на улучшение экономических и экологических качеств комбинированного двигателя внутреннего сгорания.

Описание взаимосвязи динамических и экономических качеств машинного агрегата показало, что корректирование подачи топлива по давлению наддувочного воздуха, не приводя к значительному снижению динамических показателей, является эффективным методом существенного повышения экономичности комбинированного двигателя на неустановившихся режимах работы.

4. Сформулированы основные критерии оптимальности САР комбинированного двигателя, пригодные для использования на ранней стадии проектирования с применением ЦВМ, базой которых является сравнение процессов при корректировании подачи топлива с целью согласования с подачей воздуха и повышения качества рабочего процесса, снижения дымности и токсичности выпускных газов.

5. Анализ изменения воздушно-топливного соотношения дизеля

с турбонаддувом на неустановившихся режимах работы позволил выделить условия, выполнение которых ограничивает его снижение до заранее выбранной допустимой величины путем введения в регулятор скорости положительной обратной связи по давлению наддувочного воздуха. Вскрыты основные причины возможности нарушений рабочего процесса комбинированного двигателя на неустановившихся режимах работы, связанные с недостатками традиционных схем регулирования безнаддувных дизелей.

6. На основе разработанной классификации двухимпульсных САР комбинированных двигателей и сформированных критериев оптимальности системы автоматической коррекции подачи топлива по давлению наддувочного воздуха выделены основные оптимизируемые параметры. В качестве такого основного параметра целесообразно выбрать диапазон корректирования подачи топлива — отношение подачи, контролируемой системой автоматической коррекции, к общей максимальной подаче топлива. Таким образом, диапазон корректирования может служить критерием подобия при сравнении САР широкого класса комбинированных двигателей различного назначения.

7. Исследованы основные виды систем автоматической коррекции комбинированного двигателя по давлению наддувочного воздуха, разработаны общие рекомендации по их использованию. Установлено, что применение передаточных механизмов с числом степеней свободы более единицы в конструкциях двухимпульсных регуляторов приводит к снижению массово-габаритных показателей и повышению их надежности.

8. Разработаны математические модели элементов системы автоматической коррекции подачи топлива комбинированного двигателя, пригодные для применения на ранней стадии проектирования. Моделирование критериев оптимальности комбинированного двигателя на ЦМ показало, что основное влияние на экономические и динамические показатели его оказывает диапазон корректирования топливоподачи, характеризующий соотношение подач топлива, контролируемых системой автоматической коррекции по давлению наддувочного воздуха и системой автоматического регулирования скорости.

9. Разработаны обоснованные критерии оптимальности комбинированного двигателя, пригодные для использования на начальной стадии проектирования, применение которых для расчета на ЦМ

сокращает затраты и сроки проектирования САР. Установлена связь между критериями оптимальности и оптимизируемыми параметрами машинного агрегата и комбинированного двигателя, позволяющая обосновать метод поиска оптимальных параметров САР.

10. Для условий ограниченной информации развит метод поиска оптимальных параметров системы автоматической коррекции подачи топлива комбинированного двигателя, основанный на вариации весовых коэффициентов частных критериев экономичности и быстродействия, оценена точность и устойчивость оптимального решения по выбору оптимального диапазона корректирования топливоподачи.

11. Путем теоретического анализа выявлены основные ограничения при проектировании двухимпульсной САР комбинированного двигателя по устойчивости, склонности ее к автоколебаниям, нечувствительности, управляемости и допустимому снижению воздушно-топливного соотношения из условий качества протекания рабочего процесса по токсичности и дымности выпускных газов, тепловой и механической напряженности двигателя.

12. Выявлены основные закономерности формирования равновесной двухимпульсной характеристики, установлена ее зависимость от характеристики системы наддува. Разработан метод снижения влияния характеристик системы наддува на показатели двухимпульсной САР путем применения передаточных механизмов с направленным изменением передаточного отношения.

Исследованы особенности "силового и кинематического" суммирования импульсов САР, выявлены несомненные преимущества последних по массово-габаритным показателям, нечувствительности, надежности и другим показателям.

13. Разработаны инженерные методики расчета элементов системы автоматической коррекции подачи топлива, которые используются на ряде предприятий изготовителей двигателей. Оценена точность разработанных методов расчета.

14. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработаны прогрессивные конструкции двухимпульсных регуляторов новых типов с "кинематическим" суммированием импульсов и переменным передаточным отношением, защищенные авторскими свидетельствами и принятые в производство, применение которых позволяет снизить габаритные размеры регуляторов и повысить точность регулирования, обеспечить защиту комбинированного дви-

гателя и другие вспомогательные функции.

По результатам исследований опубликовано более 60-ти работ. Основные теоретические положения диссертации получили отражение в работах:

1. Леонов О.Б., Леонов И.В. О режимах разгона двигателя. - Известия вузов. Машиностроение, 1964, №12.

2. Автоматическое регулирование скорости дизелей / В.И. Крутов, Ф.М. Данилов, И.В. Леонов и др. - М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1974.

3. Использование ЭВМ в курсе "Теория механизмов и машин": Учеб. пособие / В.В. Каганова, В.А. Никаноров, И.В. Леонов и др.; под ред. Б.И. Кривкова, И.В. Леонова, Г.А. Тимофеева. - М.: МВТУ, 1983.

4. Леонов И.В. Суммарный коэффициент избытка воздуха дизеля с турбонаддувом на периодических режимах работы. - Известия вузов. Машиностроение, 1968, №12.

5. Леонов И.В. Методика расчета двухимпульсного регулятора двигателя внутреннего сгорания. - Известия вузов. Машиностроение, 1969, №4.

6. Леонов И.В. Методика определения фактора торможения регулятора дизеля. - Известия вузов. Машиностроение, 1970, №7.

7. Леонов И.В. Изменение характеристик САР дизеля с турбонаддувом при введении корректирующего импульса по давлению наддува. - Известия вузов. Машиностроение, 1970, №8.

8. Леонов И.В. Анализ изменений коэффициента избытка воздуха дизеля с турбонаддувом на неустановившихся режимах работы. Двигателестроение, 1981, №7.

9. Леонов И.В. Дифференциальное уравнение дизеля с турбонаддувом и изменяемым углом опережения впрыска топлива. - Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научн.-техн. сборник, 1981, вып. 34.

10. Леонов И.В. Динамический синтез передаточного механизма машинного агрегата. - Известия вузов. Машиностроение, 1981, №7.

11. Леонов И.В. Оптимизация разгона силовых установок с двигателем внутреннего сгорания. - Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научн.-техн. сборник, 1982, вып. 35.

12. Леонов И.В. Оптимизация разгона машинного агрегата. - Известия вузов. Машиностроение, 1981, №9.

13. Леонов И.В. Изменение коэффициента избытка воздуха при разгоне дизеля с турбонаддувом. - Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научн.-техн. сборник, 1982, вып. 35.

14. Леонов И. В. Методика динамического расчета пневматического корректора дизеля с турбонаддувом. - Двигателестроение, 1982, № 9.

15. Леонов И. В. Формирование критериев оптимальности быстрого действия машинного агрегата с двигателем внутреннего сгорания. - Известия вузов. Машиностроение, 1982, № 7.

16. Формирование критерия оптимальности, характеризующего экономичность машинного агрегата с двигателем внутреннего сгорания. - Известия вузов. Машиностроение, 1982, № 11.

17. Леонов И. В. Статический расчет двухимпульсного регулятора дизеля с турбонаддувом. - Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научн.-техн. сборник, 1983, Вып. 37.

18. Леонов И. В. Методика расчета пневматического корректора дизеля с турбонаддувом. - Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научн.-техн. сборник, 1983, Вып. 37.

19. Леонов И. В. Методика выбора диапазона корректирования топливоподачи дизеля с турбонаддувом по допустимой степени снижения динамических качеств. - Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научн.-техн. сборник, 1983, Вып. 38.

20. Леонов И. В. Критерии оптимальности при проектировании системы автоматической коррекции комбинированного двигателя. - Известия вузов. Машиностроение, 1983, № 8.

21. Леонов И. В. Критерии оптимальности при проектировании машинного агрегата с комбинированным двигателем. - Известия вузов. Машиностроение, 1983, № 10.

22. Леонов И. В. Выбор параметров оптимального по быстродействию передаточного механизма. - Труды / МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1984, № 408. - Теория механизмов.

23. Леонов И. В. Методика выбора оптимальных параметров двухимпульсной системы автоматического регулирования. - Известия вузов. Машиностроение, 1984, № 2.

24. Леонов И. В. Автоколебания двухимпульсной САУ комбинированного двигателя. - Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научн.-техн. сборник, 1984, Вып. 39.

25. Леонов И. В. Выбор оптимальных параметров пневматического корректора дизеля с турбонаддувом. - Двигатели внутреннего сгорания: Респ. межвед. научн.-техн. сборник, 1985, Вып. 41.