

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**МИНИМИЗАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОПАСНОСТЕЙ
ПРИ СТЕНДОВОЙ ОБКАТКЕ АВТОТРАКТОРНЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ**

Минск
БГАТУ
2020

УДК 621.436.004.67

Минимизация техногенных опасностей при стендовой обкатке автотракторных двигателей / В. Г. Андруш, А. К. Евтух, С. К. Карпович, К. Д. Яшин. – Минск : БГАТУ, 2020. – 260 с. : ил. – ISBN 978-985-25-0053-1.

Монография посвящена исследованию стендовой обкатки ремонтируемых автотракторных двигателей. Проведено математическое планирование многофакторного эксперимента с целью изучения влияния факторов на мощность механических потерь двигателя в процессе обкатки.

Для научных работников, преподавателей высших и средних специальных учебных заведений, аспирантов, магистрантов, студентов и инженерно-технических специалистов агропромышленного комплекса.

Табл. 42. Ил. 36. Библиогр.: 152 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Учреждения образования «Белорусский государственный аграрный
технический университет» (протокол № 1 от 20 января 2020 г.)

Рецензенты:

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»
(доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой
безопасности жизнедеятельности *В. Н. Босак*);
кандидат экономических наук, доцент кафедры «Технологии
и организация технического сервиса» Белорусского государственного
аграрного технического университета *Е. И. Михайловский*;
директор ГУ «Белорусская МИС» *А. В. Вацула*

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ТРУДА И ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБКАТКЕ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	8
1.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов при стендовой обкатке автотракторных двигателей	8
1.2. Теоретическое описание процесса образования и распространения шума в рабочей зоне стенда для обкатки	24
1.3. Программа и методика экспериментального исследования шума	41
1.4. Результаты экспериментальных исследований	51
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОБКАТКИ ПРИ РЕМОНТЕ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	58
2.1. Значение и особенности обкатки двигателей при ремонте	58
2.2. Показатели качества приработки.	65
2.3. Анализ способов управления процессом обкатки и конструкций обкаточных стендов	74
ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РЕМОНТЕ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ	102
3.1. Определение мощности механических потерь автотракторных двигателей аналитическим методом	102
3.2. Исследование влияния различных факторов на мощность механических потерь в процессе обкатки при ремонте	113
ГЛАВА 4. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ОБКАТКИ	131
4.1. Анализ режимов приработки автотракторных двига- телей при ремонте	131
4.2. Исследование динамики изменения температуры масла, содержания продуктов износа в масле и мощности механических потерь в процессе обкатки при ремонте	143

ГЛАВА 5. СЕЛЕКТИВНОЕ УСТАНОВЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РЕЖИМОВ ОБКАТКИ	156
5.1. Разработка методики селективного установления режимов обкатки	156
5.2. Разработка автоматизированного обкаточного стенда . . .	171
5.3. Производственная проверка технологического процесса обкатки при ремонте автотракторных двигателей	179
5.4. Оценка экономической эффективности	182
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	184
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	186
ПРИЛОЖЕНИЯ	200

ВВЕДЕНИЕ

Развитая по своему составу и организационной структуре сеть ремонтно-обслуживающих предприятий РБ претерпела значительные изменения, которые оказали влияние на уровень готовности машинного парка. Основные причины этого – сокращение объемов работ по капитальному ремонту машин, агрегатов, и узлов, выполняемых специализированными ремонтными предприятиями, переориентация отдельных ремонтных заводов на выпуск новой сельскохозяйственной техники, уменьшение количества сложных ремонтно-обслуживающих работ, оказываемых хозяйствам со стороны инженерно-технических служб районного уровня.

Минсельхозпродом совместно с облсельхозпродами определены 44 базовые организации по ремонту сложной самоходной полнокомплектной техники, ее узлов и агрегатов, качественный ремонт которой в условиях сельскохозяйственных организаций не представляется возможным. Одновременно с этим поставлена задача промышленным предприятиям поставлять ремкомплекты (шорт-комплекты) для ремонта техники в хозяйствах [1].

В сельскохозяйственных организациях Республики Беларусь эксплуатируется около 82 тысяч дизельных двигателей, в том числе: на тракторах – 43, зерноуборочных комбайнах – 10, автомобилях – 20, кормоуборочных комбайнах и другой специальной технике – 9 [2].

Если учесть, что количество отказов и неисправностей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в структуре отказов для отдельных машин достигает 35–55 % [45, с. 39], а удельный вес отремонтированных машин достигает 70–80 % при моторесурсе, составляющем до 80 % от ресурса новых, то по-прежнему остается актуальной задача повышения качества ремонта двигателей и снижения расхода топливно-энергетических ресурсов [3].

Большинство деталей поступают на восстановление, имея запас остаточной долговечности, использование которой составляет основной источник экономической эффективности ремонта машин.

Капитальный ремонт машины значительно дешевле приобретения новой. Отношение стоимости капитального ремонта машины к цене новой уменьшилось в последнее время с 30–40 до 20–28 %, а двигателей – с 40–60 до 22–30 %. Эти изменения вызваны ростом

цен на новую технику и снижением стоимости ремонта, что позволяет экономить значительные средства в сравнении с закупкой такого же количества новых двигателей [4].

Годная деталь ремонтного фонда обходится производству в 3–5 % от цены новой детали завода-изготовителя, восстановленная – в 10–30 %, а приобретенная – в 110–200 %. По этой причине, к примеру, Япония удовлетворяет свою потребность в запасных частях на 40 % путем восстановления изношенных деталей, Германия и Австрия – на 30–35 % [5].

За рубежом, несмотря на достаточность автотракторных средств, вопросам ремонтно-восстановительных работ придается серьезное значение. Например, в США в настоящее время ремонтно-восстановительными работами занимаются 30 тыс. авторемонтных заводов [6].

Доходы от работ по капитальному ремонту и модернизации дизельных двигателей позволили руководству компании «Caterpillar» создать новое отделение, ежегодная выручка от которого достигла 1 млрд долларов [7].

Основными причинами низкого качества ремонта является недостаточный уровень (15 – 50 % по различным видам работ) механизации и автоматизации производственных процессов, невыполнение контрольно-измерительных операций из-за отсутствия необходимых приборов и средств автоматизации (до 40 % общего количества дефектов приходится на эти операции), неудовлетворительное качество мойки и очистки, некачественное выполнение сборочных, регулировочных и обкаточно-испытательных операций, отсутствие системы менеджмента качества [4; 8; 9].

Обкатка – важнейшая завершающая технологическая операция ремонта автотракторного двигателя. Цель обкатки не только в подготовке поверхностей трения к восприятию эксплуатационных нагрузок, но и в выявлении и устранении дефектов деталей, сборки и регулировки сопряжений.

В значительной мере качество ремонта двигателей снижается в результате их неполной приработки по неоптимальным режимам. За счет проведения высококачественной обкатки на ремонтном предприятии межремонтный срок службы двигателя увеличивается на 20–30 %.

При производстве и, особенно, ремонте дизельных двигателей действуют факторы неидентичности технологии изготовления, сборки

и регулировки. Все это формирует так называемые индивидуальные особенности двигателей и является причиной того, что даже у конструктивно одинаковых образцов на одинаковых режимах работы имеет место значительный разброс показателей (мощности, удельные расходы топлива, расходы масла на угар, температуры охлаждающей жидкости, масла, давления масла и т. д.).

Сложная взаимосвязь и механизмы явлений при приработке ДВС, их главные количественные характеристики до сих пор остаются невыясненными, следовательно, не созданы предпосылки для направленного изменения процессов с целью последующей оптимизации приработки.

Механическое воспроизведение режимов приработки, разработанных на базе технологического процесса ремонта двигателей одного предприятия и положительно там себя зарекомендовавших, не всегда может обеспечить наилучший результат на другом.

В то же время при проведении обкатки при регулировке ДВС операторы ощущают отрицательное воздействие опасных и вредных производственных факторов, что повышает вероятность появления производственного травматизма, ведет к развитию профессиональных заболеваний, проведение обкатки требует значительных трудозатрат и расхода горюче-смазочных материалов, поэтому необходимо проводить дальнейшие исследования процесса послеремонтной стендовой обкатки автотракторных дизелей с разработкой методики и технических средств назначения оптимального по длительности режима [10].

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ТРУДА И ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБКАТКЕ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

1.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов при стендовой обкатке автотракторных двигателей

Улучшение условий труда и обеспечение безопасности на производстве имеют важное значение и требуют качественного профессионального обучения каждого работающего, личного соблюдения требований профессиональных инструкций по охране труда, правил производственной и трудовой дисциплины. Реализация задач по оптимизации и улучшению условий труда, снижению воздействия факторов производственной среды и предупреждению профессиональных заболеваний у работающих позволила в целом по республике уменьшить на 21 % количество впервые выявленных случаев профессиональных заболеваний, снизить количество рабочих мест, не отвечающих гигиеническим требованиям по шуму на 4,3 %, по пыли на 1,6 %, освещенности на 1,2 % [11]. Вместе с тем обстановка с условиями труда остается напряженной. В условиях, не отвечающих гигиеническим нормативам, трудится более 30 % работающих от общего числа. Наибольшая занятость в таких условиях отмечается в организациях г. Минска – 51 % (при численности работников, занятых на рабочих местах с вредными и (или) опасными условиями труда 65 657 человек), в Брестской области 35 % (70 289), Гомельской области 33 % (115 228) (табл. 1.1).

По результатам комплексной гигиенической оценки условий труда установлено, что условия труда на 173 279 рабочих местах (79 %) оценены как вредные и опасные. Из них к вредным условиям труда первой степени (класс 3.1) отнесено 81 тыс. рабочих мест (36,8 %), к вредным условиям второй степени (класс 3.2) – 72 тыс. рабочих мест (32,8 %), к вредным условиям третьей степени (класс 3.3) – 18 тыс. рабочих мест (8,4 %), к вредным условиям четвертой степени (класс 3.4) – 1,6 тыс. рабочих мест (0,7 %), к опасным условиям труда (класс 4) – 24 рабочих места (0,01 %) [11].

Таблица 1.1

Характеристика факторов производственной среды

Наименование административной территории	Количество обследованных рабочих мест	Удельный вес обследованных рабочих мест, не соответствующих санитарным нормам							
		Пыль и аэрозоль		Шум		Вибрация		Микроклимат	
		Всего	Не соотв.	Всего	Не соотв.	Всего	Не соотв.	Всего	Не соотв.
Брестская	7892	1976	8 %	3248	30,2 %	1449	12,9 %	39,9	4,8 %
Витебская	12339	2014	21 %	4720	24,5 %	1331	29,6 %	7333	16,2 %
Гомельская	11274	3170	5 %	7518	43,6 %	3127	31,5 %	8150	19,2 %
Гродненская	14724	4290	5,4 %	6393	22,9 %	1969	7,5 %	7571	5,3 %
Минск	10726	1433	10,6 %	3084	28,7 %	1285	13,3 %	4482	16,2 %
Минская	12932	4976	11,6 %	9316	39,8 %	2546	37,9 %	8719	13,3 %
Могилевская	6952	1660	21 %	3390	38 %	675	28,1 %	4420	21,9 %
Итого:	76 839	19 519	10,5 %	37 669	33,9 %	12 382	24,6 %	44 577	13,9 %

На 46 545 тыс. рабочих мест условия труда оценены как оптимальные и допустимые (классы 1 и 2) (рис. 1.1).

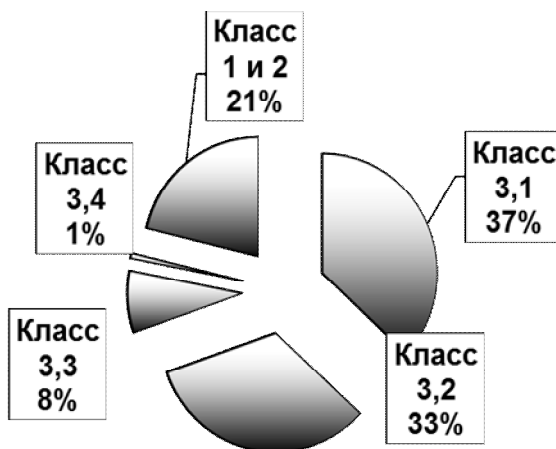


Рис. 1.1. Гигиеническая оценка условий труда

Основными вредными факторами производственной среды, уровни которых не соответствуют гигиеническим нормативам, по-прежнему остаются шум – на 25 % рабочих местах из числа обследованных и вибрация – на 17 % рабочих местах (рис. 1.2).

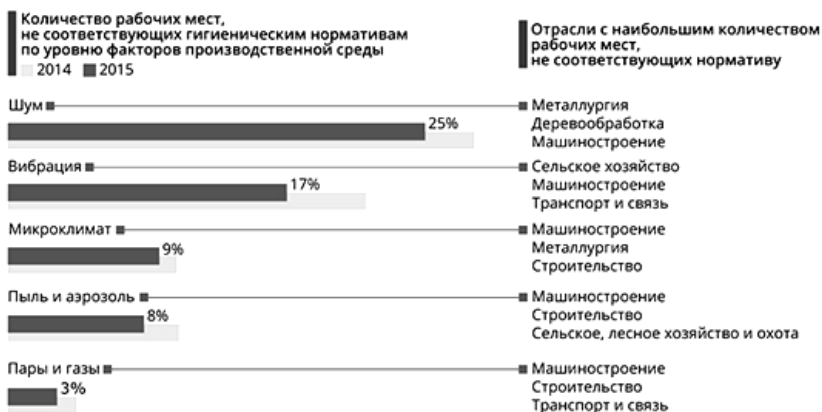


Рис. 1.2. Количество рабочих мест, не соответствующих гигиеническим нормативам

При обкатке и испытании двигателей внутреннего сгорания функции операторов сводятся к контролю протекания приработки, управлению данным процессом, регулировке, выявлению и устранению неисправностей. Поэтому необходимо постоянное присутствие работника при испытании ДВС, что, в свою очередь, неблагоприятно отражается на его безопасности и здоровье, положение также усугубляется нарастающей мощностью испытываемых двигателей, что ведет к большей тяжести и напряженности труда.

Исследование функционального состояния испытателей, занятых на обкатке дизельных двигателей показали, что к концу смены у них снижается сила (9,2 %) и выносливость к статическому усилию (до 29 %), на 25 % увеличивается время скрытого периода двигательной реакции (на свет и звук), а также увеличивается число ошибок [12].

Процесс обкатки в научном аспекте изучен достаточно широко [13; 14; 15]. В результате этих работ предлагаются различные способы сокращения продолжительности приработки, выявлена роль смазочного масла и отдельных присадок к нему, определены оптимальные шероховатости трущихся поверхностей, проведены расчетные исследования режимов обкатки, раскрыты некоторые химические и физико-механические явления, происходящие в узлах трения двигателей.

Проблема человеческого фактора в производственном процессе обкатки учитывается не достаточно. Операторы при обкатке ДВС

подвергаются воздействию большего числа опасных и вредных производственных факторов, длительное воздействие которых неблагоприятно отражается на работоспособности и здоровье человека, способствует появлению различных травм и несчастных случаев.

Социологическое исследование с целью выявления у операторов испытательных станций степени удовлетворенности условиями труда, определения наиболее опасных и вредных производственных факторов проведено В. Н. Кравченко. В исследовании применялся анкетный метод, который позволил выявить отношение людей к определенным элементам условий труда. За единицу наблюдения при исследовании принимался отдельный оператор испытательной станции, всего было опрошено 46 испытуемых в возрасте от 20 до 53 лет со стажем работы от 0,5 до 38 лет.

В исследовании применялся анкетный метод, результаты опроса показали, что операторы в основном удовлетворены работой (54,4 %), 17,4 % ответили, что им нравится и 28,2 % не дали однозначного ответа. Из основных причин неудовлетворенности работой 82 % указали на плохие условия труда. Из отдельных факторов условий труда, как наиболее неблагоприятных при проведении испытаний, более половины операторов (52,5 %) выделили сильный шум, 35,6 % – загазованность.

Отрицательное воздействие опасных и вредных производственных факторов операторы ощущают при проведении обкатки, а также при регулировке ДВС, это повышает вероятность появления производственного травматизма, ведет к развитию профессиональных заболеваний. Из числа факторов, которые наиболее часто приводят к травмам, операторы выделили нагретые части двигателя (41,3 %), скользкий и грязный пол в результате попадания на него остатков масла, воды и топлива (43,5 %). Так же операторы отметили травмоопасность от движущихся частей двигателя (8,7 %).

В результате исследования были выделены основные опасные и вредные производственные факторы в рабочей зоне стенда, которые представлены в табл. 1.2:

Таблица 1.2

Опасные и вредные производственные факторы

№ п/п	Опасные и вредные производственные факторы	Ранжирование
1	Повышенный уровень шума	1,0
2	Загазованность воздуха в рабочей зоне	0,8
3	Попадание на кожу топливо-смазочных материалов	0,7

№ п/п	Опасные и вредные производственные факторы	Ранжирование
4	Повышенный уровень вибрации	0,6
5	Избытки тепловых излучений	0,5
6	Недостаточная освещенность	0,1
7	Пожаро- и взрывоопасность	0,09
8	Подвижные части оборудования	0,07
9	Опасность поражения электрическим током	0,05
10	Динамические физические перегрузки	-
11	Нервно-психические перегрузки	-

Одной из причин травматизма, причем, весьма тяжелого, являются операции по установке и снятию двигателя с тормозного стенда. Для уменьшения травмоопасности и трудоемкости подъемно-транспортных операций применяют различные установочные устройства разнообразных конструкций: кран подвесной мостовой, схватка для подъема двигателя и тележка. Широкое распространение получила конструкция, в которой двигатель до поступления на обкаточный стенд устанавливается и закрепляется на специальной тележке, затем по направляющим рельсам тележку с двигателем подкатывают к стенду.

Операторы испытательных станций вынуждены много перемещаться при обслуживании двигателя и ведении контроля, что не исключает появления травм при падении, причиной которых служит скользкий пол из-за попадания на него остатков масла, топлива, воды.

Возникновению механических травм и термических ожогов способствуют движущиеся и нагретые части двигателя, трубопроводы системы выхлопа. Использование электрических тормозов при обкатке различных двигателей создает потенциальную опасность поражения электрическим током.

Проявление опасных производственных факторов в процессе обкатки двигателей зависит от уровня организации и культуры производства, конструкции стендов, качества ремонта и сборки двигателя.

Работа операторов испытательных станций проходит в крайне неблагоприятных условиях, так как двигатель внутреннего сгорания является источником интенсивного шума, повышенных вибраций, вредных газо- и тепловыделений.

Даже если над обкатываемым двигателем предусмотрен поворотный вытяжной зонт, то из-за его громоздкости, сложности и

неэффективности вытяжки испытатель не всегда устанавливает его над двигателем. Вредные газы от двигателя идут в направлении вверх и, следовательно, в значительной мере проходят через зоны дыхания человека, поэтому операторы участка обкатки работают в условиях высокой загазованности воздуха помещения. Источником вредных выделений являются отработавшие газы, проникающие в помещение через неплотности выхлопного патрубка системы газовахлопа, картерные газы, образуемые утечками рабочей смеси через сопряжение двигателя и парами смазочного масла, а также пары, выделяющиеся при испарении и горении смазочного масла и обгорании краски двигателя. Из всех вышеперечисленных вредных выделений основным источником токсических веществ в ДВС являются отработавшие газы, на их долю приходится 90 % общей суммы вредных выделений двигателя. Состояние вентиляции – самое слабое звено при проведении обкатки, здесь проявляются техническое несовершенство проектов, надежность имеющихся конструкций, отсутствие устройств автоматического регулирования параметров вентиляции. В результате повышенной загазованности происходит сокращение этапов обкатки под нагрузкой, при которой выделяется максимум отработавших газов.

Состав отработавших двигателей на 99,0...99,9 % состоит из продуктов полного сгорания (диоксида углерода и паров воды), неиспользованного кислорода и азота воздуха, но именно оставшаяся часть отработавших газов определяет степень вредного воздействия на работника. Наиболее токсичным компонентом из общего состава являются оксиды азота, в отработавших газах присутствует около 10 различных соединений азота с кислородом. В отработавших газах дизельных двигателей на долю оксида азота приходится 95 – 98 % из всех оксидов, остальные 2 – 5 % диоксид азота, которые разрушают легочную ткань, вызывая хронические заболевания, необратимые изменения в сердечно-сосудистой системе. В соединении с углеводородами оксиды азота образуют токсичные нитроолефины, вызывающие заболевание слизистых оболочек верхних дыхательных путей, хронические бронхиты, нервные расстройства [16].

Большую опасность представляет воздействие оксида углерода – бесцветный газ без запаха и вкуса, плохо растворим в воде, горюч.

Попадая в легкие человека, вытесняет кислород из крови, поскольку имеет в 200 раз большую растворимость. При небольших концентрациях приводит к головокружению и тошноте. Поскольку оксид углерода практически имеет ту же плотность, что и воздух, то самостоятельно улетучивается из помещения очень плохо.

Углеводороды – самая многочисленная группа соединений, имеют неприятный запах, вызывают многие хронические заболевания и оказывают раздражающее действие, а один из элементов этой группы (бензапирен) обладает канцерогенным действием, т. е. способствует развитию онкологических заболеваний.

Соединения серы – хорошо растворимы в воде, обладают резким запахом, вызывают раздражение верхних дыхательных путей, нарушение белкового обмена в организме.

Сажа – представляет собой мельчайшие частицы углерода, самые мелкие способны по несколько суток витать в воздухе, попадая в легкие человека, вызывая раздражение и заболевания. В отличие от промышленной сажи от ДВС несет на себе частицы несгоревших углеводородов топлива, в том числе и бензапирен.

Оксиды свинца – вещество, которое способно накапливаться в организме работника, негативно воздействовать на умственные способности, а также на внутренние органы, вызывая в них мутагенные изменения [17].

В процессе обкатки работник подвергается воздействию интенсивного шума. Под источником шума двигателя следует понимать рабочие процессы в цилиндрах, механизмах и системах, при осуществлении которых возникают периодические свободные силы, возмущающие звуковые колебания конструкции – вибрации и колебания в окружающей воздушной среде – шум. Основными источниками шума в поршневых двигателях является процесс сгорания топлива в цилиндрах, рабочие динамические процессы в механизмах и системах, процессы газообмена (процесс выпуска отработавших газов и процесс впуска свежего заряда). По оценке шум при работе автотракторных двигателей составляет 95–120 дБ. Результаты исследования документов аттестации рабочих мест на «Березовском мотороремонтном заводе» показали, что уровни звукового давления при обкатке на стендах КИ-5274, КИ-5542 двигателей ЯМЗ-236, ЯМЗ-238НБ, ЯМЗ-240Б (БМ), Д-65, Д-240, Д-243, Д-245 составляют 98–105 дБА [18]. Предельно допустимый

уровень шума в соответствии с ГОСТ 12.1.003 для работников испытательных станций составляет 80 дБА, уровень же шума в боксе обкатки автотракторных двигателей достигает 98 дБА, а уровень шума на прилегающем к боксам участке сборки и разборки двигателей – 88 дБА, превышение над допустимым уровнем шума составляет от 8 до 18 дБА.

Сложность разработки средств защиты от шума при испытании автотракторных дизелей заключается и в том, что применяемые конструкторские решения не должны оказывать влияния на работу двигателя и на его контролируемые выходные параметры, так как конечной целью обкатки является достижение значений технико-экономических показателей (мощность, давление масла, температура охлаждающей жидкости и масла, скорость вращения коленчатого вала), соответствующих техническим условиям.

В то же время опыт борьбы с шумом показывает, что недостаточно ограничиться применением одного шумозащитного средства, необходимо проводить дополнительные расчеты и, определив наиболее шумные источники, применять комплекс мероприятий по его снижению. Из-за большего газовыделения и шума двигателя большой мощности рекомендуется обкатывать в специально изолированных отсеках (боксах), применять автоматизацию процессов обкатки. Коренное улучшение условий труда операторов обкаточно-испытательных стендов достигается при сокращении продолжительности режимов и автоматизации процесса обкатки двигателя. Эти направления являются ведущими в развитии стендовых испытаний, они позволяют повысить производительность стендов на 70–80 %, сократить обслуживающий персонал на 34 %, значительно улучшить условия труда за счет сведения к минимуму пребывания работника в помещениях обкатки.

Неблагоприятному воздействию высоких уровней шума подвергаются и работники прилегающих участков и цехов. Длительное воздействие шума такой интенсивности вызывает целый ряд изменений в организме человека, особенно со стороны органа слуха, центральной нервной и сердечно-сосудистой систем.

На предприятии уровни звукового давления нередко значительно превышают предельные спектры шума, установленные санитарными нормами. Шум большой интенсивности, действуя на органы слуха, приводит к частичной или даже полной глухоте.

Область слышимых человеком звуков ограничивается не только определенными частотами (16–20 000 Гц), но и определенными предельными значениями звуковых давлений и их уровней. Эти предельные

значения уровней звукового давления изображены двумя кривыми (рис. 1.3). Нижняя кривая соответствует порогу слышимости, величина которого изменяется в зависимости от частоты звука, так как чувствительность слухового аппарата человека различна к звукам разной частоты. На частоте 1000 Гц, принятой в качестве стандартной частоты сравнения в акустике, пороговое значение звукового давления $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па соответствует порогу слышимости – $L = 0$ дБ. Верхняя кривая – порог болевого ощущения. Звуки, превышающие по своему уровню этот порог, могут вызвать боли и повреждения в слуховом аппарате человека. Область на частотной шкале, лежащая между порогом слышимости и порогом болевого ощущения, называется областью слухового восприятия [19].

Исследованиями установлено, что любой шум создает нагрузку на нервную систему человека. Его воздействие по-разному проявляется у людей в зависимости от возраста, состояния здоровья, характера труда, физического и душевного состояния [19].

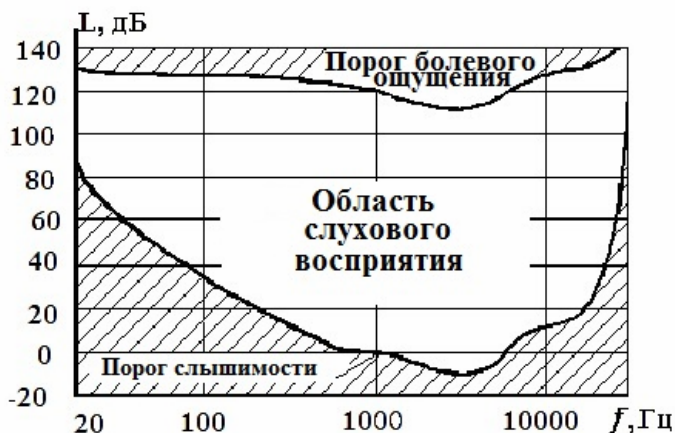


Рис. 1.3. Слуховое восприятие человека

Ухо обладает наибольшей чувствительностью в области частот от 800 до 4000 Гц. На практике колебания с частотой в диапазоне 20–300 Гц относят к низким тонам, в диапазоне 300–3000 Гц – к средним, а в диапазоне 3000–20 000 Гц – к высоким. Все воспринимаемые звуки ухом человека могут быть оценены уровнем от 0 до 140 дБ над порогом слышимости или над порогом звукового восприятия.

На производстве приходится сталкиваться с маскирующим действием шумов, приводящим к нарушению слышимости. Степень заглушения достигает иногда такой величины, что трудно разбирать речь и звуковые сигналы. Сохранение разборчивости речи имеет большое значение в условиях шумного производства как для общения работающих при выполнении ими технологического процесса, так и для обеспечения безопасности работ (рис. 1.4) [21].

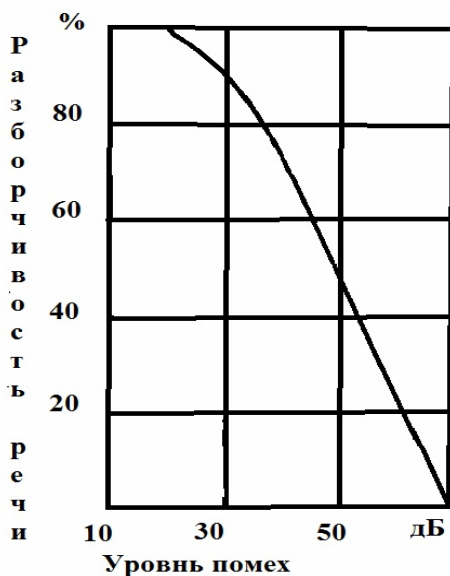


Рис. 1.4. Зависимость разборчивости речи от уровня шума

На рис. 1.4 показана зависимость изменения разборчивости речи от шумовых помех. Если уровень помех составляет 20 дБ, то такой шум не мешает разборчивости речи. С повышением уровня помех разборчивость речи падает. Разборчивость, составляющая 75 % от исходной разборчивости (что соответствует уровню помех в 40 дБ), считается удовлетворительной. Начиная с 45 дБ маскирующего действия шума, происходит заметное ослабление разборчивости речи. При уровне помех до 70 дБ и выше речь становится неразборчивой.

Снижение слуховой чувствительности у работающих на шумных производствах зависит от интенсивности и частоты звука. Так,

минимальная интенсивность, при которой начинает проявляться утомляющее действие шума на орган слуха, зависит от частоты входящих в него звуков. Для звуков частотой 2000–4000 Гц утомляющее действие начинается с 80 дБ, для звуков частотой 5000–6000 Гц – с 60 дБ. Появление утомления органа слуха следует рассматривать как ранний сигнал угрозы развития тугоухости и глухоты. Синдромом заболевания слухового рецептора являются головные боли и шум в ушах, иногда потеря равновесия и тошнота.

В процессе развития тугоухости барабанная перепонка утолщается и слегка вытягивается, происходят изменения в нервных окончаниях слухового нерва. Одновременно происходит переутомление подкорковых слуховых центров, регулирующих трофику уха, что приводит к нарушению питания чувствительных клеток.

Быстрота развития потери слуха при действии шума в первые 3–5 лет значительно выше, чем в последующие годы, заметное ослабление слуха наступает при уровнях шума 90–100 дБ через 20 лет, при уровнях 100–105 дБ – через 14 лет и при уровнях более 105 дБ – через 6 лет. Под действием длительного систематического интенсивного шума производительность труда на ряде производств снижается до 60 %, а число ошибок, допускаемых в расчетных работах, увеличивается более чем на 50 % (рис. 1.5) [19].

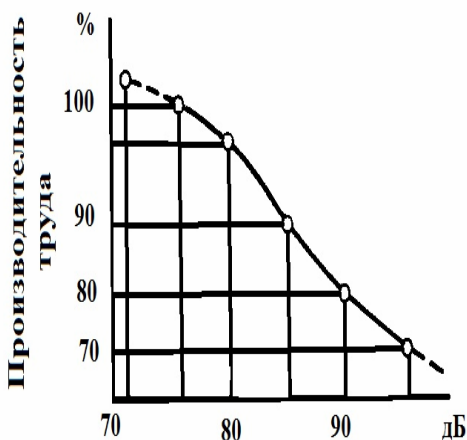


Рис. 1.5. Зависимость производительности труда от уровня шума

На рис. 1.5 показана зависимость производительности труда от среднего уровня шума в течение рабочего дня. При увеличении уровня шума с 70 до 100 дБ производительность труда снижается на 30 %, что значительно сказывается на рентабельности производства.

Действие шума на организм человека не ограничивается воздействием на орган слуха. Через волокна слуховых нервов раздражение шумом передается в центральную и вегетативную нервную системы, а через них воздействует на внутренние органы, приводя к значительным изменениям в функциональном состоянии организма, влияет на психическое состояние человека, вызывая чувство беспокойства и раздражения. Человек, подвергающийся воздействию интенсивного шума, затрачивает в среднем на 10–20 % больше физических и нервно-психических усилий, чтобы сохранить выработку, достигнутую им при уровне звука ниже 70 дБА. Установлено повышение на 10–15 % общей заболеваемости рабочих шумных производств.

Воздействие шума на вегетативную нервную систему проявляется даже при небольших уровнях звука (40–70 дБА) и не зависит от субъективного восприятия шума человеком. Из вегетативных реакций наиболее выраженным является нарушение периферического кровообращения за счет сужения капилляров кожного покрова и слизистых оболочек, а также повышение артериального давления (при уровнях звука выше 85 дБА). В то время как для вегетативной нервной системы характерно четкое соответствие между шумом и реакцией, в области психики такое соответствие отсутствует. Установлено, что выраженные психические реакции появляются уже, начиная с уровня звука, равных 30 дБА. При этом решающую роль в психической оценке неприятности шума играет личное отношение человека к этому шуму. Воздействие на психику возрастает с увеличением частоты и уровня шума, а также с уменьшением ширины полосы частот шума. Воздействие шума на центральную нервную систему вызывает увеличение латентного (скрытого) периода зрительно-моторной реакции, приводит к нарушению подвижности нервных процессов, изменению электроэнцефалографических показателей, нарушает биоэлектрическую активность головного мозга с проявлением общих функциональных изменений в организме, уже при шуме 50–60 дБА, существенно изменяет биопотенциалы мозга, их динамику, вызывает биохимические изменения в структурах головного мозга. При импульсных и нерегулярных шумах степень воздействия шума повышается.

Изменения в функциональном состоянии центральной и вегетативной нервных систем наступают гораздо раньше и при меньших уровнях шума, чем снижение слуховой чувствительности [19].

В настоящее время «шумовая болезнь» характеризуется медицинской наукой комплексом симптомов. К объективным симптомам шумовой болезни относятся: снижение слуховой чувствительности, изменение функции пищеварения, выражающееся в понижении кислотности, сердечно-сосудистая недостаточность, нейро-эндокринные расстройства.

Работающие в условиях длительного шумового воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах и т. д. Такие сдвиги в работе ряда органов и систем организма человека могут вызвать негативные изменения в эмоциональном состоянии человека вплоть до стрессовых. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость в связи с повышенными энергетическими затратами и нервно-психическим напряжением, ухудшается речевая коммутация. Все это снижает работоспособность человека и его производительность, безопасность и качество труда.

В табл. 1.3 представлены оптимальные уровни звука в зависимости от категории тяжести и напряженности труда, являющиеся безопасными в отношении сохранения здоровья и работоспособности.

Таблица 1.3

Оптимальные уровни звука (дБА), на рабочих местах для труда разных категорий и напряженности

Категория напряженности труда	Категория тяжести труда			
	1. Легкая	2. Средняя	3. Тяжелая	4. Очень тяжелая
1. Малонапряженный	80	80	75	75
2. Умеренно напряженный	70	70	65	65
3. Напряженный	60	60	+	+
4. Очень напряженный	50	50	+	+

Длительность воздействия шума на организм человека зависит от следующих условий:

- интенсивности шума: чем больше интенсивность шума, тем быстрее развивается утомление;
- периода воздействия шума: профессиональные заболевания работника развиваются обычно постепенно, в течение нескольких лет;
- индивидуальной особенности организма работника, стажа работы и возраста;
- спектра шума: чем более высокие частоты преобладают, тем шум становится более раздражительным, возникает опасность развития тугоухости и быстрое утомление.

Немаловажное значение для предотвращения развития профессиональных заболеваний играют предварительные и периодические медицинские осмотры. Медосмотры помогают контролировать возникновение и развитие болезней слуха у работников, занятых на работах, где шум превышает предельно допустимые уровни.

Таким образом, шум оказывает существенное влияние практически на весь организм человека, поэтому снижение воздействия шума на работника позволит повысить производительность труда, уменьшить число профессиональных заболеваний и количество несчастных случаев.

Шум автотракторного двигателя – следствие протекания совокупности рабочих процессов в цилиндрах, механизмах и системах при осуществлении рабочих циклов преобразования химической энергии в тепловую энергию и далее в механическую. К источникам шума двигателя относят динамические процессы в цилиндрах, механизмах и системах, при осуществлении которых возникают периодические свободные силы, возмущающие звуковые колебания конструкций.

Основными источниками шума в двигателе являются:

- процесс сгорания топлива в цилиндрах, который сопровождается возникновением газодинамических сил;
- рабочие процессы в механизмах и системах (кривошипно-шатунном, клапанном, распределительном, системах смазки и топливоподачи), сопровождающиеся возникновением сил инерции, ударов в сопряжении и других видов сил;
- процесс взаимодействия вентилятора системы охлаждения с воздушной средой (аэродинамический шум) [20].

На протяжении рабочего цикла силы, действующие во всех сопряжениях кривошипно-шатунного механизма, многократно меняют свой знак. Изменение направления действия силы приводит к соударению

относительно перемещающихся звеньев и появлению вибрационных импульсов. Удары могут возникать в коренных и шатунных подшипниках коленчатого вала, в сопряжении шатун-поршневой палец-поршень, а также между поршнем и гильзой цилиндра. Такие удары приводят к повышенному шуму двигателя.

В зависимости от природы образования и характера излучения шум, генерируемый двигателем в воздушной среде, можно разделить на шум, излучаемый элементами конструкции наружной поверхности двигателя, и шум, генерируемый в воздушной среде в результате процессов газообмена на входе и на выходе впускной и выпускной систем, а также взаимодействие лопастей вентилятора с воздушным потоком. Поэтому первую составляющую шума двигателя называют механическим шумом двигателя, а вторую аэрогазодинамическим. Необходимо также отметить, что аэрогазодинамические процессы в двигателе вызывают вибрацию элементов конструкции двигателя, в результате чего генерируется воздушный шум, однако вся звуковая энергия концентрируется в воздушной среде непосредственно возле впускных и выпускных систем отверстий и лопастей вентилятора, поэтому шумом этих процессов, излучаемых во время вибраций, пренебрегают [21].

Изучение, прогнозирование характеристик и оценку шума двигателя необходимо проводить независимо друг от друга, т. е. независимо рассматривать четыре основных составляющих общего шума двигателя:

- механический шум двигателя;
- шум процесса впуска;
- шум процесса выпуска;
- шум вентилятора системы охлаждения;
- шум стенда обкатки ДВС.

Шум и вибрации при обкатке автотракторных дизелей возникают вследствие развития колебательных процессов в упругих системах двигателей с последующим излучением энергии колебаний в окружающее пространство. При осуществлении рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания газовые объемы, заключенные во впускной и выпускной системах, испытывают возмущения. Интенсивность возмущений определяется перепадом давлений, возникающих при наполнении и очистке цилиндров. Излучение звуковой энергии при этом осуществляется через впускную или выпускную трубу [23].

Усилия, развивающиеся в цилиндрах двигателя при сжатии и сгорании, вызывают колебания вещества внутри цилиндра, а также колебания стенок камеры сгорания и поршня. К вибрациям стенок картера и других деталей двигателя приводят соударения, происходящие в механизмах двигателя при изменении знака действующей силы. Вибрации, возникающие в определенном месте двигателя, распространяются по элементам конструкций, и их энергия передается окружающей среде.

В системе охлаждения присутствуют периодически действующие источники шума. Период действия этих источников определяется конструкцией элементов охлаждения и, в первую очередь, вентилятора.

Развиваемый крутящий момент, моменты сил инерции служат причинами колебаний двигателя на стенде, под действием этих сил он колеблется и может быть рассмотрен как точечный излучатель.

Потоки газа и процессы трения между относительно движущимися элементами также приводят к появлению акустического излучения. Совокупное акустическое излучение двигателя получается довольно сложным, так как каждый источник принимает участие в формировании звукового поля, количество источников шума в двигателе, их относительная интенсивность в зависимости от конструкции и способа осуществления рабочего цикла могут быть различные. В работах И. И. Славина, В. И. Зинченко, И. И. Клюкина и других исследователей доказано, что общий уровень шума двигателя можно представить как сумму уровней шума, создаваемого каждым источником, при этом предполагается, что действие каждого источника шума происходит независимо один от другого [24].

Выше было отмечено, что причинами образования шума и вибрации служат силы, развивающиеся при работе двигателя. В результате совокупного действия сил возникают источники шума в системах впуска и выпуска, системе охлаждения, цилиндрах двигателя при осуществлении процесса сгорания, топливоподающей системе и т. д. Интенсивный шум возникает при соударении деталей двигателя и трении в его подвижных сочленениях.

Совокупное действие всех источников шума двигателя приводит к интенсивному акустическому излучению в окружающее пространство и к возникновению сложного звукового поля двигателя.

Таким образом, выпускная система большинства современных двигателей является источником наиболее интенсивного шума и в значительной мере определяет общий уровень шума двигателя.

Поэтому выпускная система двигателя нуждается в применении различных устройств, снижающих уровень шума. Однако при этом не должны существенно ухудшаться технико-экономические показатели двигателя.

1.2. Теоретическое описание процесса образования и распространения шума в рабочей зоне стенда для обкатки автотракторных двигателей

Проблемами снижения шума занимаются многие ученые и специалисты, накоплен значительный арсенал знаний, технических разработок и научных исследований в этой области. Степень снижения шума производственных процессов и промышленного оборудования является показателем безопасности.

Меры уменьшения шума весьма разнообразны, к ним можно отнести следующие: рациональная планировка участков обкатки, акустическая обработка производственных помещений, размещение штучных поглотителей, применение глушителей шума впуска и выпуска, акустические экраны и звукопоглощающие кожухи [20].

Результаты акустического расчета мероприятий по уменьшению шума послужили основой при разработке и проектировании в реальных производственных условиях средств по снижению шума на испытательных станциях ДВС. Для снижения уровня шума на участке обкатки им разрабатывался комплекс технических решений:

- постановка шумозащитного капота для обкатываемых автотракторных дизелей;
- устройство звукоизолированной кабины для дистанционного автоматизированного управления процессом обкатки;
- разработка глушителя шума выхлопа.

Результаты измерений уровней звукового давления на рабочих местах операторов испытательных станций при работе двигателей на режиме номинальной мощности показывают, что по сравнению с предельно допустимыми уровнями превышение составляет при обкатке автотракторных двигателей от 9 до 25 дБ, при испытании тепловозных двигателей от 10 до 33 дБ [25].

В основу акустического расчета В. Н. Кравченко положил методику расчета ожидаемой шумности строительных и дорожных машин, предложенную Н. И. Ивановым и Г. М. Курцевым. Для расчетной схемы принималось:

- звуковое поле, образованное под капотом – квазидиффузное, а в помещении испытательной станции – диффузное;
- двигатель является излучателем сферических или цилиндрических волн;
- резонансные явления, возникающие в замкнутых объемах, не учитываются;
- угол падения звуковой волны на наружные ограждения принимается нормальным;
- капот выполнен из элементов равной звукоизоляции.

На основании методики расчета ожидаемой шумности машин общая интенсивность звука в любой точке под капотом определяется как сумма интенсивности прямого и отраженного звука, с учетом коэффициентов, учитывающих влияние ближнего звукового поля и учитывающего нарушение диффузности в помещении:

$$I = W_{\text{дв}} \frac{\chi_{\text{ном}}}{e} \frac{4}{\Omega} \frac{\tau_{\text{дв}}^2}{B_{\text{кап}}} + Y_{\text{кап}} \frac{4}{B_{\text{кап}}} \frac{\ddot{\phi}}{\phi}, \quad (1.1)$$

где $W_{\text{дв}}$ – акустическая мощность источника звука, Вт;

$\chi_{\text{ном}}$ – коэффициент, учитывающий влияние ближнего звукового поля;

Ω – угол, в котором происходит излучение;

$\tau_{\text{дв}}$ – расстояние от источника до стенки капота, м;

$Y_{\text{кап}}$ – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности в помещении;

$B_{\text{кап}}$ – постоянная капота, $B_{\text{кап}} = (S_{\text{кап}} \alpha_{\text{кап}}) / (1 - \alpha_{\text{кап}})$;

$S_{\text{кап}}$ – площадь поверхности капота, м²;

$\alpha_{\text{кап}}$ – средний коэффициент поглощения под капотом.

Звуковая энергия, прошедшая через стенки капота, определяется:

$$W_{\text{пр.}}^{\text{кап}} = I_{\text{пад}}^{\text{кап}} \prod_{i=1}^n (t_{\text{кап}} S_{\text{кап.}i}) W, \quad (1.2)$$

где $t_{\text{кап}}$ – звукопроводность элементов капота;

$I_{\text{пад}}^{\text{кап}}$ – интенсивность звука в расчетной точке под капотом, Вт/м²;

$S_{\text{кап.}i}$ – площадь элементов капота, м²;

n – число элементов ограждения капота;

Ω – угол, в котором происходит излучение.

Интенсивность звука в расчетной точке, расположенной на расстоянии $R_p = 1,5-2$ м от стенок капота:

$$I_{\text{расч}} = W_{\text{пр}}^{\text{кап}} \frac{\alpha_{\text{с}}}{\epsilon} \frac{\omega_{\text{пом}}}{WR_p^2} + Y_{\text{пом}} \frac{4}{B_{\text{пом}}} \frac{\ddot{\omega}}{\omega} \quad (1.3)$$

где $W_{\text{пр}}^{\text{кап}}$ – звуковая энергия, прошедшая через стенки капота, Вт.

$\chi_{\text{лом}}$ – коэффициент, учитывающий влияние ближнего звукового поля;

Ω – угол, в котором происходит излучение;

R_p^2 – расстояние от стенок капота до расчетной точки, м;

$\Psi_{\text{пом}}$ – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности в помещении;

$B_{\text{пом}}$ – постоянная помещения, $B_{\text{кап}} = \mu \mathcal{B}_{\mu} \times 1000$, м²;

μ – частотный множитель.

После подстановки (1.2) в (1.3) получим:

$$I = W_{\text{дв}} \frac{\alpha_{\text{с}}}{\epsilon} \frac{\omega_{\text{пом}}}{W t_{\text{дв}}^2} + Y_{\text{кап}} \frac{4}{B_{\text{кап}}} \frac{\ddot{\omega}}{\omega} \frac{\tau_{\text{кап}}}{\rho} \left(t_{\text{кап}} S_{\text{кап}.i} \right) W \frac{\alpha_{\text{с}}}{\epsilon} \frac{\omega_{\text{пом}}}{WR_p^2} + Y_{\text{пом}} \frac{4}{B_{\text{пом}}} \frac{\ddot{\omega}}{\omega} \quad (1.4)$$

где $W_{\text{дв}}$ – акустическая мощность источника, Вт;

$\chi_{\text{лом}}$ – коэффициент, учитывающий влияние ближнего звукового поля;

Ω – угол, в котором происходит излучение;

$\tau_{\text{дв}}$ – расстояние от источника до стенки капота, м;

$\Psi_{\text{кап}}$ – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности в помещении;

$B_{\text{кап}}$ – постоянная капота, $B_{\text{кап}} = (S_{\text{кап}} \alpha_{\text{кап}}) / (1 - \alpha_{\text{кап}})$;

$t_{\text{кап}}$ – звукопроводность элементов капота;

$S_{\text{кап}.i}$ – площадь элементов капота, м²;

R_p^2 – расстояние от стенок капота до расчетной точки, м;

$\Psi_{\text{пом}}$ – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности в помещении;

$B_{\text{пом}}$ – постоянная помещения, $B_{\text{кап}} = \mu \mathcal{B}_{\mu} \times 1000$, м².

Уровень звука в расчетной точке получим, разделив обе части уравнения (1.4) на соответствующие пороговые значения, и путем логарифмирования соответствующих отношений:

$$10 \ln \frac{I_n}{I_0} = L, \quad (1.5)$$

где L – уровень звукового давления, дБ;

L_w – уровень звуковой мощности, дБ;

I_n – интенсивность звука в расчетной точке, Вт/м²;

$I_0 = 10^{-12}$ – интенсивность звука, соответствующая пороговому уровню, Вт/м²;

$$10 \ln \frac{W}{W_0} = L_w, \quad (1.6)$$

где W – звуковая мощность источника, Вт;

$W_0 = 10^{-12}$ – звуковая мощность, соответствующая пороговому значению, Вт.

Определить ожидаемые уровни звукового давления на рабочем месте оператора испытательной станции при использовании шумозащитного капота со звукоизоляцией отдельных ограждающих элементов можно по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \text{ЗИ} = L_{w \text{ дс}} - L_{\text{норм}} + 10 \lg \frac{\alpha_{\text{с кап}}}{\epsilon_{\text{с}} W_{\text{дв}}^2} + Y_{\text{кап}} \frac{4}{B_{\text{кап}}} \frac{\Omega}{\varnothing} + 10 \lg \sum_{i=1}^n S_{\text{кап. } i} + \\ + 10 \lg \frac{\alpha_{\text{с пом}}}{\epsilon_{\text{с}} W_{\text{р}}^2} + Y_{\text{пом}} \frac{4}{B_{\text{пом}}} \frac{\Omega}{\varnothing} \end{aligned}, \quad (1.7)$$

где L_w – уровень звуковой мощности, дБ;

$\chi_{\text{пом}}$ – коэффициент, учитывающий влияние ближнего звукового поля;

Ω – угол, в котором происходит излучение;

$\tau_{\text{дв}}$ – расстояние от источника до стенки капота, м;

$\Psi_{\text{кап}}$ – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности в помещении;

$B_{\text{кап}}$ – постоянная капота, $B_{\text{кап}} = (S_{\text{кап}} \alpha_{\text{кап}}) / (1 - \alpha_{\text{кап}})$;

$\tau_{\text{кап}}$ – звукопроводность элементов капота;
 $S_{\text{кап},i}$ – площадь элементов капота, м²;
 R_p^2 – расстояние от стенок капота до расчетной точки, м;
 $\Psi_{\text{пом}}$ – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности в помещении;

$B_{\text{пом}}$ – постоянная помещения, $B_{\text{кап}} = \mu \times B_{\text{м}} \times 000$, м².

Уравнение (1.7) позволяет определить ожидаемые уровни звукового давления на рабочем месте оператора испытательной станции при использовании шумозащитного капота со звукоизоляцией отдельных ограждающих элементов или рассчитать минимальную приведенную звукоизоляцию капота, исходя из обеспечения нормативных значений уровней звукового давления.

Используя выражение (1.7) для расчета требуемой минимальной звукоизоляции капота, В. Н. Кравченко в своей работе определил, что минимальная требуемая приведенная звукоизолирующая способность конструкции капота незначительно отличается в диапазоне низких и высоких частот, должна составлять 13–18 дБ для $f = 125 - 8000$ Гц.

Расчет звукоизолирующей способности кабины оператора проводился по формуле:

$$\begin{aligned}
 \text{ЗИ} = & L_{w \text{ дв}} - L_{\text{норм}} + 10 \lg \frac{\alpha c_{\text{пом}}}{\epsilon W R p^2} + \Psi_{\text{пом}} \frac{4}{B_{\text{пом}}} \frac{\ddot{a}}{\varnothing} + \\
 & + 10 \lg \frac{\dot{a}^n}{B_{\text{каб}}} \frac{S_{\text{кап},i}}{S_{\text{каб}}} + 10 \lg \frac{S_{\text{каб.нар}}}{S_{\text{пом}}} + 6 + 10 \lg m, \quad (1.8)
 \end{aligned}$$

где m – количество испытываемых двигателей в помещении;

$S_{\text{каб.нар}}$ – площадь элементов кабины снаружи, м²;

$S_{\text{пом}}$ – площадь помещения внутри кабины, м².

В соответствии с расчетами кабина для испытателя должна иметь звукоизолирующую способность на низких частотах от 20–24 дБ, а на средних и высоких частотах 8–22 дБ.

В. Н. Кравченко рассчитал необходимое заглушение шума выхлопа, из полученных автором экспериментально, в процессе стендовых испытаний двигателей данных, следует, что глушитель шума выхлопа

должен обеспечивать заглушение на низких частотах до 19 дБ, а на высоких – до 14 дБ.

Спроектированный глушитель шума выхлопа является комбинированным и состоит из реактивного глушителя для эффективно-го заглушения низкочастотных составляющих и активного – для заглушения высокочастотного спектра шума. Расчет реактивного глушителя проводился по теории четырехполюсника, результаты расчета заглушения реактивного глушителя составляют от 13 до 52 дБ, что достаточно для обеспечения допустимых уровней звукового давления.

Для расчета активного глушителя использовалась формула Паркинсона [13]:

$$DL_A = -5,12l \ln(1 - \alpha) \sqrt{\frac{P}{F_0}}, \quad (1.9)$$

где P – периметр сечения канала, м;

F_0 – площадь поперечного сечения канала, м²;

α – коэффициент звукопоглощения материала глушителя;

l – длина канала, м.

Данные расчета активного глушителя показывают, что он обеспечивает заглушение шума выхлопа в диапазоне $f = 125–8000$ Гц от 5 до 34 дБ.

При проектировании глушителя шума выхлопа ДВС на испытательных станциях в некоторых случаях более удобным считается использование конструкции подземного глушителя шума. Преимуществами такого глушителя являются простота конструкции, не требующая изготовления индивидуальных глушителей для каждого двигателя, менее трудоемкий уход и меньшее гидравлическое сопротивление отработанных газов двигателя. Конструкция глушителя представляет собой подземный канал, сложенный из сборного железобетона, выхлопные патрубки испытуемых двигателей подключаются к входу подземного канала.

Потери звуковой мощности при распространении выхлопных газов по конструкции подземного канала складываются из потери по длине канала, на поворотах. Для дополнительного заглушения шума выхлопа канал глушителя разделяется перегородкой с

соединительными трубопроводами, которая выполняет роль реактивного глушителя. Гидравлическое сопротивление глушителя 1579 Па, что меньше по сравнению с сопротивлением индивидуального глушителя (3097 Па) и допустимым (5067 Па). Исходя из расчетов, теоретическое заглушение составляет на частотах $f = 63 - 500$ Гц 13–42 дБ, а при $f = 500 - 8000$ Гц 18–29 дБ.

Одним из методов снижения шума, как на открытой местности, так и в производственных помещениях является метод экранирования, использующий методы звукоизоляции и звукопоглощения. Метод экранирования применяется, в первую очередь, в больших шумных помещениях, где другие методы малоэффективны или неприемлемы с технико-экономической точки зрения. Использование акустических экранов и выгородок в шумных производственных помещениях целесообразно в том случае, когда уровень звукового давления прямого звука от ближайшего источника шума намного выше, чем уровни, создаваемые в той же точке соседними источниками шума или отраженным звуком. Наиболее распространенным материалом для изготовления экранов являются стальные или алюминиевые пластины толщиной 1...3 мм, покрытые слоем минеральной ваты толщиной 50–60 мм и перфорированным листом. Недостатком конструкции является пористая звукоизолирующая облицовка на экранах, поскольку при наличии запыленности в цехе облицовка засоряется, при этом снижается коэффициент звукопоглощения облицовки, что уменьшает эффективность экрана, поэтому требуется периодическая очистка от пыли. Такого недостатка лишен шумозащитный экран, звукопоглощение в котором осуществляется резонирующими полостями, размещенными на пластинах со стороны источника шума.

Экран состоит из основания, звукопоглощающие элементы, выполненные в форме полых полуцилиндров с отверстиями, прикреплены к основанию и расположены параллельными рядами. Полуцилиндры выполнены с диафрагмами, расположены перпендикулярно к их продольной оси, причем диаметры элементов смежных рядов выполнены переменными, увеличивающимися по высоте пластины. Плоские пластины основания выполняются преимущественно из плотного материала типа бетона и жестко соединены между собой опорными стойками. Высота пластин и количество параллельных рядов звукопоглощающих элементов варьируются в широких пределах в зависимости от спектральных характеристик источника шума и его габаритных размеров.

В работах авторы предлагают экраны в виде подъемного полотна, опускаемого при необходимости [20]. Такие экраны применяются в помещениях в случаях, если установка экрана на пол затруднена по технологическим причинам.

Практика показывает, что брезентовые шторы обеспечивают снижение звука на 1–2 дБА, а экран, изготовленный из обычной отработанной конвейерной ленты, позволяет снизить шум на 10 дБА.

В зарубежной практике получили распространение переносные занавеси из специальной резины толщиной 2,5 мм. Эти занавеси отличаются долговечностью, устойчивостью к огню и воздействию химических веществ. Степень поглощения шума зависит от материала занавесей и достигает 32 дБА.

Применяются также гибкие многослойные пленки, изготовленные из освинцованной виниловой пленки в сочетании со звукопоглощающим пенопластом. Эффективность звукопоглощения и звукоотражения зависит от массы и наибольший эффект достигается при плотности пленок не менее 2,8 кг/м³.

Многообразные применяемые акустические экраны для снижения шума в производственных помещениях имеют недостаточную эффективность, особенно в более низких частотах.

Для увеличения эффективности акустических экранов необходимы теоретические и экспериментальные исследования.

Одним из способов снижения шума при обкатке ремонтируемых автотракторных двигателей является улучшение демпфирующих свойств конструкций, применение виброизоляции и вибродемпфирования.

Стальные конструкции имеют низкий коэффициент потерь, что позволяет эффективно использовать различные средства вибропоглощения, а для чугунных корпусных деталей, хотя и имеющих коэффициент потерь больше, чем у стальных, применение вибропоглощающих покрытий еще более эффективно. Одним из основных преимуществ этого метода является то, что можно обойтись без кардинального изменения конструкции. Вибропоглотители рекомендуются устанавливать в местах установки основных источников вибрации. Для вибродемпфирования излучателей шума рекомендуется использовать вибропоглощающие покрытия. Доказано экспериментально, что наибольший эффект на низких частотах обеспечивают жесткие покрытия, на средних – армированные, на высоких – мягкие.

Исследования шума и вибрации показали, что заметное снижение акустической активности сварных конструкций может быть достигнуто применением сыпучих вибропоглощающих материалов: песка, чугунной дроби. Основные достоинства такого способа – малая стоимость материала и низкая трудоемкость их нанесения, рекомендуемая толщина слоя сыпучего поглотителя равна двух- или трехкратной толщине демпфирующего элемента.

Эффективный метод снижения шума и вибрации обеспечивает виброизоляция отдельных механизмов, устанавливаемых на виброизолирующие прокладки и амортизаторы. Установка электродвигателя на резиновые шайбы толщиной 10 мм и диаметром 35 мм позволяет снизить шум на 10–20 дБ на частотах выше 1000 Гц, а установка резиновых прокладок толщиной 8 мм приводит к снижению шума на 6 дБ.

Широкие амортизаторы с малой высотой нежелательны, так как они имеют чрезмерную жесткость. Резина, находясь под нагрузкой, сохраняет постоянство объема. Поэтому резиновые амортизаторы, имеющие высоту, значительно меньшую, чем ширину, не в состоянии сохранять объем постоянным, что значительно увеличивает модуль их упругости. Таким образом, часто подстилаемые под вибрирующие механизмы резиновые ковры практически не приносят никакой пользы. Если все же возникает необходимость использовать широкие листы резиновых амортизаторов, тогда необходимо делать их перфорированными или рифлеными, в этом случае пустоты не будут препятствовать расширению резины при вертикальном сжатии.

Недостатком резиновых амортизаторов является их недолговечность. Резиновые виброизоляторы со временем становятся жестче и через 5 лет их необходимо заменять, кроме того резиновые виброизоляторы не позволяют получить очень низкие собственные частоты колебаний системы, которые необходимы для тихоходных агрегатов, из-за неизбежной в этом случае перегрузки прокладок, что значительно сокращает срок их службы [24].

Вклад шума выпуска в процесс шумообразования составляет 10–50 % и зависит от эффективности глушителей, расположения выпускной трубы и направления выпуска, степени оснащенности работника шумозащитными средствами. Полая расширительная камера эффективна в частотных диапазонах 63–8000 Гц, где снижение уровней звукового давления составляет 8–15 дБ. При уменьшении

на $\frac{1}{4}$ длины глушителя его эффективность снижается на 2–7 дБ в низких и средних частотах и незначительно в высоких. При введении в конструкцию глушителя перегородок глушитель из однокамерного превращается в четырехкамерный, эффективность на низких частотах снижается на 4–10 дБ, а на средних и высоких частотах повышается из-за сглаживания газового потока. В случае замены в конструкции глушителя выхода в виде трубы на перфорированную перегородку его эффективность возрастает в широком диапазоне. Сравнение трехкамерного и четырехкамерного глушителей показало, что их эффективность на высоких частотах практически не отличается. Наличие соединительной трубы между камерами ухудшает эффективность четырехкамерного глушителя на 5–8 дБ. Двухкамерный глушитель с входной и выходной перфорированными трубами эффективнее, чем аналогичный трехкамерный на средних частотах на 5–8 дБ, а однокамерный глушитель с перфорированными входной и выходной трубами на 7–15 дБ эффективнее во всем частотном диапазоне, чем полый глушитель. Для снижения низкочастотных составляющих шума выхлопа двигателя необходимо увеличивать объем глушителя, а для снижения средне и высокочастотных – увеличивать площадь перфорации в глушителе.

Б. Ч. Месхи и В. Ю. Радоуцкий в своих работах провели испытания глушителей шума выхлопа, которые показали следующее:

- заглушение шума выпуска ДВС резонансными глушителями незначительно из-за влияния газового потока;
- комбинированные глушители нецелесообразны из-за малого заглушения резонансного элемента;
- увеличение числа камер в глушителе нецелесообразно;
- эффективное заглушение достигается применением элементов глушителя с перфорацией;
- с увеличением площади перфорации и длины пути, проходящими выхлопными газами, эффективность глушителя растет;
- глушитель с мелкой и частой перфорацией эффективнее, чем крупной и одиночной при одинаковой суммарной площади перфорации;
- поворот потока газов перед выходом из глушителя увеличивает его заглушение.

Несмотря на многообразие существующих способов проблема защиты от шума при стендовой обкатке автотракторных двигателей остается до конца нерешенной.

Исследуя процесс шумообразования при обкатке автотракторных дизелей, авторы исходят из того, что звуковое поле, создаваемое оборудованием в помещении, складывается из прямого звука, который излучается непосредственно источником, и отраженного звука, образующегося в результате отражений от ограждающих конструкций бокса для обкатки автотракторных дизелей.

Точную картину звуковых полей в помещении дает только волновая теория. Но эта теория сложна, так как она базируется на представлениях о формировании звуковых полей в помещениях как процессах, протекающих в колебательной системе с распределенными параметрами [25]. Опыт использования волновой теории для расчетов звуковых полей помещений показал, что ее применение для решения практических задач весьма ограничено. Это связано с двумя причинами. Первой причиной является сложность теории и ее математического аппарата. Вторая причина обусловлена идеализацией граничных условий. Наличие в помещениях сложного по форме крупногабаритного оборудования, отклонения форм помещений от правильных объемов, акустическая неоднородность ограждений, отсутствие точных данных о звукопоглощении, приводит к неопределенности в задании граничных условий. Поэтому методы волновой теории в основном применяются при оценках звука, распространяющегося в пустых помещениях и каналах, когда размеры помещений меньше или сравнимы с длинами волн. В то же время степень точности, достаточная в большинстве практических задач акустики помещений, достигается более простыми методами, в которых рассматривается распространение звуковых полей, а не волн.

Все основные существующие методы расчетов уровней звукового давления в производственных помещениях разработаны на основе положений геометрической и статистической теорий акустики. Границы их применения определяются условиями и факторами, влияющими на формирование звуковых полей (рис. 1.6).

При теоретических расчетах шума в различных точках бокса обкатки следует разделять ближнее и дальнее звуковое поле. В области ближнего звукового поля рабочее место попадает в область прямого звука. Для расчетов в дальнем звуковом поле, граница которого определяется из условия $s > I_{отр}$ (где s – расстояние от источника до расчетной точки, м; $I_{отр}$ – составляющая отраженного звука, Вт/м) авторами в большинстве случаев используется статистическая теория, которая базируется на представлении звукового поля в замкнутом объеме как диффузного.



Рис. 1.6. Факторы, влияющие на формирование звуковых полей

Звуковое поле называют диффузным, если оно, во-первых, однородно (усредненная по времени плотность звуковой энергии во всех точках одинакова) и, во-вторых, изотропно – на единичную площадку, помещенную в любой точке поля, падает одно и то же количество энергии за единицу времени, независимо от ее ориентации. Следовательно, та же энергия падает за единицу времени на единицу площади ограждений помещения).

Граница диффузного звукового поля определяется условием:

$$f_{\text{диф}} = \frac{500}{\sqrt[3]{V}}, \quad (1.10)$$

где V – объем помещения, м^3 .

Тогда в области диффузного звукового поля в помещении интенсивность звука определяется по формуле:

$$I = I_{\text{пр}} + I_{\text{отр}}, \quad (1.11)$$

где $I_{\text{пр}}$ – составляющая прямого звука, Вт/м^2 ;

$I_{\text{отр}}$ – составляющая отраженного звука, Вт/м^2 .

Составляющая прямого звука при обкатке автотракторного двигателя определяется по формуле:

$$I_{\text{пр}} = \frac{\epsilon W \varphi}{2\pi r^2}, \quad (1.12)$$

где W – акустическая мощность источника, Вт;

ϵ – коэффициент, учитывающий влияние ближнего звукового поля источника;

φ – фактор направленности источника;

r – расстояние от источника до расчетной точки, м.

Эта зависимость представляется в более удобном для расчетов виде (в виде уровня звукового давления):

$$L = L_w - 20lgr + 10lg\varphi - 8, \quad (1.13)$$

где L – уровень звукового давления, дБ;

L_w – уровень звуковой мощности источника, дБ.

Авторы указывают, что в большинстве случаев, в качестве исходных величин можно использовать не уровни звуковой мощности (L_w), а уровни создаваемого им звукового давления ($L_{\text{ист}}$), в этом случае зависимость (1.13) принимает вид:

$$L = L_{\text{ист}} - 20lgr + 10lg\varphi. \quad (1.14)$$

Составляющая отраженного звука учитывает особенности помещения:

$$I_{\text{отр}} = \frac{4\mu W}{B_n}, \quad (1.15)$$

где μ – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности звукового поля в помещении;

B_n – постоянная помещения, м².

$$B_n = \frac{1}{1 - \bar{a}} \sum_{i=1}^n a_i S_i; \bar{a} = \frac{1}{S_{\text{пом}}} \sum_{i=1}^n a_i S_i, \quad (1.16)$$

где a_i – частотно зависимый коэффициент звукопоглощения i -го ограждающего элемента;

S_i – площадь соответствующей ограждающей конструкции, м²;

$S_{\text{пом}}$ – суммарная площадь ограждающих поверхностей помещения, м².

На основе этих выражений определяются уровни шума, создаваемые оборудованием, в соответствующих точках помещения:

$$L = L_w - 10 \lg \frac{\rho \dot{\phi}}{4\pi r^2} + \frac{4\mu \ddot{\phi}}{B_n \frac{1}{\phi}} + 10 \lg K_y, \quad (1.17)$$

где K_y – количество одинаковых источников.

Наиболее эффективным способом снижения шума в кабине, на рабочем месте испытателя является увеличение звукоизолирующих свойств стен, пола, потолка, дверей и окон.

На самых современных испытательных станциях обкаточные боксы представляют собой две комнаты, комната управления процессом обкатки и комната непосредственного размещения обкатываемого двигателя, которые разделяются перегородкой из кирпича. Кирпичная перегородка покрыта специальным звукопоглощающим материалом, акустические панели. Такие кабины обеспечивают снижение шума 10–20 дБ в широком диапазоне частот.

Наряду с увеличением звукоизолирующих свойств стен необходимо проводить тщательную акустическую герметизацию элементов ограждений, так как одним из слабых элементов рабочего места испытателя является переходная дверь и наблюдательное окно между кабиной управления и боксом обкатки. Учитывая различный характер возбуждения отдельных элементов (стены, стекло, испытуемый двигатель, стенд обкаточный), целесообразно рекомендовать для отдельных элементов кабины различное конструктивное исполнение.

Так, для наблюдательного окна рекомендуется использовать двухкамерный стеклопакет толщиной 40 мм, с воздушным промежутком, равным 28 мм, и использованием стекла толщиной 4 мм, кроме этого, желательно уменьшить площадь остекления до пределов, допустимых требованиями эргономики (с точки зрения обзора испытателя), так как использование больших площадей остекления может привести к возникновению дополнительных вибраций. Переходную дверь между комнатой управления и комнатой испытания двигателей необходимо тщательно герметизировать.

Звукоизоляция является наиболее универсальным методом снижения шума, применение специальных звукоизолирующих конструкций, рациональное проектирование и установка традиционных

конструкций позволяют понизить шум, который воздействует на испытателя при обкатке автотракторных дизелей на 15 и более дБ.

Для ограждений большой протяженности звукоизоляция подчиняется закону масс:

$$\text{ЗИ} = 20 \lg m_0 f - 47,5 \text{ дБ}, \quad (1.18)$$

где $m_0 = \rho h$ – поверхностная плотность ограждения, кг/м²;

ρ – плотность материала, кг/м³;

h – толщина стенки ограждения, м.

При нанесении вибропоглощающих покрытий уменьшаются резонансные колебания стенок ограждения на собственных частотах.

Величина $\text{ДЗИ}_{\text{вп}}$ зависит от отношения:

$$\beta = \frac{\mu_n}{\mu_0}, \quad (1.19)$$

где μ_n и μ_0 – коэффициент потерь конструкции с нанесенным покрытием и без него, определяются по данным работ [17, 18].

Для аналитических расчетов основной интерес представляет вычисление звукоизоляции при диффузном падении звука, что достигается усреднением звукоизоляции по всем возможным направлениям:

$$\text{ЗИ} = 20 \lg \frac{\pi f_{\text{ГР}}^m}{\rho_0 c_0} + 30 \lg \frac{f}{f_{\text{ГР}}} + 10 \lg \mu - 3 \text{ дБ}, \quad (1.20)$$

где $f_{\text{ГР}}$ – граничная частота волнового совпадения, определяемая соотношением:

$$f_{\text{ГР}} = \frac{c_0^2}{1,8 \frac{Eh}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (1.21)$$

где ρ – плотность материала, кг/м³, коэффициент Пуассона.

Эти формулы можно использовать для расчета звукоизоляции, если длина изгибной волны превышает толщину самой стенки кожуха не менее, чем в 6 раз. Длина изгибной волны связана с толщиной стенки и частотой.

Для снижения производственного шума на предприятиях применяются следующие основные методы:

- устранение причин или ослабление шума в источнике его возникновения;

- снижение шума на пути распространения;

- использование индивидуальных средств защиты работающих.

Основными способами борьбы с шумом на производстве являются:

- рациональный выбор конструкции и квалифицированный уход за оборудованием;

- звукоизоляция отдельных машин и рабочих мест;

- применение средств звукопоглощения в виде облицовок или штучных поглотителей шума;

- архитектурно-планировочные мероприятия;

- индивидуальные средства защиты против шума.

Рациональный выбор конструкций и квалифицированный уход за агрегатом являются наиболее реальными и эффективными методами в производственных условиях и широко применяются на практике. При этом следует отдавать предпочтение менее шумным агрегатам и установкам.

Своевременно производя замены устаревшего и изношенного оборудования, важно предусматривать замену механизмов с возвратно поступательными движениями механизмами с вращательными движениями, применять детали с большим коэффициентом потерь. Необходимо снижать вибрацию механизма и его деталей путем установки гибких связей, прокладок, пружин, применять минимальные допуски при сборке и изготовлении деталей и узлов агрегата.

Наиболее целесообразно предупреждать возникновение шума на стадии проектирования, так как снижение шума действующего оборудования вызывает на практике большие трудности. Следует также учитывать, что борьба с шумом машины будет эффективной лишь в том случае, если станут широко применяться методы квалифицированного ухода за ней – своевременная смазка, периодический ремонт, тщательная регулировка.

Второй способ борьбы с шумом – звукоизоляция наиболее шумных агрегатов и рабочих мест. Технические возможности этого способа борьбы с шумом в настоящее время весьма велики в связи с развитием автоматизации производственных процессов. Средства звукоизоляции в зависимости от конструкции подразделяются на:

- звукоизолирующие ограждения зданий и помещений;
- звукоизолирующие кожухи;
- звукоизолирующие кабины;
- акустические экраны и выгородки.

Заключение шумного агрегата в звукоизолирующий кожух позволяет создать на рабочем месте более благоприятные санитарно-гигиенические условия.

При невозможности снижения шума в его источнике шумящие агрегаты должны быть выделены в специальные шумоизолированные помещения, кабины или закрыты звукоизолирующими кожухами. Наиболее целесообразно при такой изоляции шумящего агрегата является устройство дистанционного управления им с выносом пульта управления в малозумные помещения. Иногда шумящие агрегаты остаются в помещении, а для обслуживающего персонала устраивается звукоизолирующая кабина.

Третий способ борьбы с шумом – применение звукопоглощения. Как известно, облицовка ограждающих поверхностей промышленных зданий звукопоглощающими материалами применяются на практике. Многие предприятия характеризуются весьма большими производственными площадями, причем наблюдается определенная тенденция роста производственных площадей и объема цехов новых заводов. Основная масса рабочих в цехах сконцентрирована непосредственно у источников звуковой энергии.

Таким образом, различные производственные помещения имеют следующие характерные признаки:

- большой объем;
- интенсивные источники излучения звуковой энергии с уровнями звуковых давлений 90–110 дБ;
- концентрацию наибольшего количества рабочих мест в производственных помещениях около источников шума.

Каждый из этих признаков является достаточным для того, чтобы признать нецелесообразность применения методов борьбы с шумом средствами звукопоглощения в производственных помещениях.

Однако использование звукопоглощения для борьбы с шумом оправданно только в тех случаях, когда можно расположить звукопоглотители вблизи источника шума. Следовательно, можно рекомендовать метод борьбы с шумом средствами звукопоглощения, как дополнительный метод к остальным, более эффективным. Снижение производственного шума применением архитектурно-планировочных решений заключается в группировке отдельных, наиболее шумных агрегатов в изолированные помещения, установке ограждающих или звукоизолирующих экранов. В ряде случаев достаточно применения обычного брезентового экрана, чтобы создать в остальной части цеха благоприятный шумовой режим. Однако только при автоматизации технологического процесса и дистанционном управлении агрегатом, т. е. когда рабочие удалены из зоны повышенной шумности, централизованные посты управления могут быть полностью изолированы от вредного воздействия шума и для обслуживающего персонала будут созданы нормальные санитарно-гигиенические условия.

С целью снижения вредного воздействия шума на организм рабочих применяются индивидуальные средства защиты от шума.

В случаях, когда техническими мерами достигнуть допустимого уровня шума не удастся, следует применять индивидуальные средства защиты от шума. Периодический отдых от сильного шумового воздействия позволяет снизить его вредное воздействие, может рекомендоваться в цехах, где шум существующими техническими средствами не может быть снижен до безвредных уровней, кроме использования СИЗ, устройства звукоизолированных помещений, в которых работающие могут находиться во время обеденных и других перерывов в работе.

Таким образом, для производственных помещений наиболее рациональными являются следующие способы борьбы с шумом: снижение шума в самом источнике его возникновения, средствами звукоизоляции, применением дистанционного управления и средств автоматизации, а также сокращением продолжительности обкатки и испытания автотракторных двигателей.

1.3. Программа и методика экспериментального исследования шума

По временным характеристикам шум подразделяют на постоянные и непостоянные. В отличие от постоянных непостоянные

уровни звукового давления за восьмичасовой рабочий день изменяются во времени более чем на 5 дБА при измерениях на временной характеристике шумомера «медленно» и по шкале «А». Шкала «А» позволяет определить уровни звукового давления, являющиеся геометрической суммой всех звуков в полосе от 40 до 10 000 Гц. Непостоянные шумы подразделяют на колеблющиеся во времени (уровень звукового давления неравномерно изменяется во времени), прерывистые (интервал 1 с и более) и импульсные. Импульсные состоят из одного или нескольких звуковых сигналов, каждый длительностью менее 1 с, при этом уровни звукового давления в дБА, измеренные при включении характеристик «медленно» и «импульс», отличаются не менее чем на 10 дБА.

Для ориентировочной оценки постоянного шума допускается принимать уровень звукового давления в дБА, измеряемый по шкале «А» шумомера. В этом случае давление звука (P_a) является среднеквадратичной величиной спектра. Шум, замеренный по шкале «А», соответствует субъективному восприятию спектральной энергии звуков.

Измерение шума на рабочих местах испытателей проводим в соответствии с ГОСТ 12.1.050 и ГОСТ 12.1.003.

Шум, излучаемый при проведении испытаний двигателя внутреннего сгорания, относится к классу постоянных шумов. Характеристикой такого шума на рабочих местах являются уровни звукового давления в дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц, определяется по формуле:

$$L = 20 \lg \frac{P}{P_0}, \quad (1.22)$$

где P – среднеквадратическое значение звукового давления, Па;

P_0 – исходное значение звукового давления, в воздухе $P_0 = 2 \times 10^{-5}$ Па.

Для ориентировочной оценки допускается в качестве характеристики постоянного широкополосного шума на рабочих местах принимать уровень звука в дБА, измерять на временной характеристике «медленно» шумомера по ГОСТ 17187–81 и определять по формуле:

$$L_A = 20 \lg \frac{p_A}{p_0}, \quad (1.23)$$

где p_A – среднеквадратическое значение звукового давления с учетом коррекции «А» шумомера, Па.

Для проведения измерения шума на рабочем месте испытателя авто-тракторных двигателей следует применять шумомеры 1-го класса по ГОСТ 17187 с полосовыми электронными фильтрами по ГОСТ 17168.

До и после измерений на одной или нескольких частотах диапазона измерений необходимо проводить акустическую калибровку шумомера.

Измерения следует проводить при температуре, магнитных и электрических полях, допускаемых изготовителями аппаратуры.

Перед началом проведения измерения требуется проверить соответствие условиям измерений. Размеры помещения для проведения измерений должны быть достаточны, чтобы разместить в центре испытуемый источник и вокруг него на выбранной измерительной поверхности точки измерения.

Необходимо проводить проверку условий свободного звукового поля определением показателя акустических условий K_2 , который характеризует степень отличия реального звукового поля от свободного звукового поля, искажаемого за счет отражений звука от границ испытательного помещения и окружающих испытуемый источник шума звукоотражающих объектов.

Показатель акустических условий должен быть $K_2 \leq 7$ дБ, если он превышает 7 дБ, то следует:

- выбрать меньшую измерительную поверхность, но так, чтобы она была вне ближнего звукового поля источника шума (не ближе 0,25 м от огибающего параллелепипеда для измерительной поверхности в виде параллелепипеда и не менее 1 м – для полусферической измерительной поверхности);

- уменьшить звукоотражение от стен и потолка испытательного помещения.

Показатель акустических условий K_2 рассчитываем по формуле:

$$K_2 = 10 \lg \left(1 + 4 \frac{\sum S \bar{\alpha}}{S_A} \right), \quad (1.24)$$

где S – площадь измерительной поверхности, м²;

A – эквивалентная площадь звукопоглощения в помещении, м²;

$$A = \alpha S_V, \quad (1.25)$$

где α – средний коэффициент звукопоглощения для измерений на характеристике А шумомера по таблице А.1 Приложения А ГОСТ 31275–2002;

S_V – площадь ограничивающих поверхностей (стен, потолок, пола) испытательного помещения, м².

Источник шума, обкатываемый двигатель, установлен в боксе на обкаточно-испытательном стенде так же, как он устанавливается при обкатке по техническим условиям, расстояние от стен и потолка должно быть достаточным для построения вокруг измерительной поверхности.

Выбирается форма измерительной поверхности в виде полусферы, части полусферы или прямоугольного параллелепипеда, измерительная поверхность служит местом размещения точек измерений.

Полусферическую и часть полусферической измерительной поверхности выбирают, когда проводят измерения на больших открытых площадках и при измерении показателя направленности источника шума.

Измерительную поверхность в виде параллелепипеда выбирают при измерениях на открытых площадках или в помещениях с неблагоприятными акустическими условиями, когда много звукоотражающих объектов в испытательном пространстве и велик фоновый шум, что предопределяет выбор меньшего измерительного расстояния d .

Радиус должен быть не менее двух характеристических размеров d_0 и должен выбираться из ряда 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 м, насколько это позволяют размеры испытательного пространства.

Измерительное расстояние d измеряют по перпендикуляру между соответствующими гранями измерительной поверхности и огибающего параллелепипеда и выбирают из ряда 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8 м, насколько это позволяет испытательное пространство. Предпочитаемое значение $d = 1$ м.

Определяется площадь измерительной поверхности в виде параллелепипеда:

$$S = 4(ab + bc + ca), \quad (1.26)$$

где a – длина источника шума;

b – ширина источника шума;

c – высота источника шума.

Длина, ширина и высота источника шума определяются по следующим формулам:

$$a = 0,5l_1 + d; \quad (1.27)$$

$$b = 0,5l_2 + d; \quad (1.28)$$

$$c = l_3 + d, \quad (1.29)$$

где l_1 , l_2 , l_3 – длина, ширина, высота огибающего параллелепипеда. Схема расположения точек измерений представлена на рис. 1.7.

Для измерительной поверхности в виде параллелепипеда назначаем основные точки измерения на измерительной поверхности. Каждую грань измерительной поверхности делим на наименьшее возможное число прямоугольных участков равной площади с максимальной длиной стороны $3d$ (d – измерительное расстояние). Точки измерения помещают в центр каждого участка и по его углам, кроме углов, прилегающих к звукоотражающей плоскости.

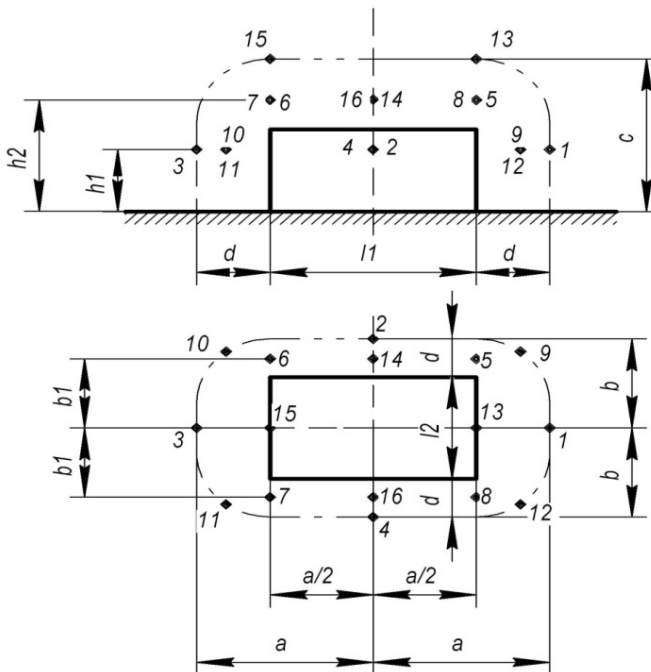


Рис. 1.7. Схема расположения точек измерений

Для уменьшения погрешности измерения шума в одной точке проводятся измерения не менее 3 раз. Средний уровень шума по результатам нескольких измерений в одной точке или измерений в разных точках определяется как среднее арифметическое при условии, если разность уровней звукового давления в соседних измерительных точках не превышает 5 дБ. Если уровень звукового давления в соседних измерительных точках превышает 5дБ, то необходимо использовать дополнительные точки.

Если источник излучает шум с высокой направленностью или исходит в основном от небольшой части источника, например, из отверстия со всех сторон закрытой машины, должны быть использованы дополнительные измерительные точки в области высокого уровня шума.

Последовательно устанавливаются микрофон в точки измерения, каждый раз ориентируя микрофон на источник шума в направлении, перпендикулярном к грани измерительной поверхности в виде параллелепипеда.

Продолжительность измерения при постоянном шуме должна быть не менее 30 с, в каждой точке измеряются уровни звука и уровень звукового давления в полосах частот при неработающем и работающем источниках шума, используя временную характеристику «S-медленно» шумомера.

Между микрофоном и источником шума не должны находиться люди и посторонние предметы, искажающие звуковое поле. Расстояние между микрофоном и наблюдателем должно быть не менее 0,5 м.

Средний уровень звука L_p , дБА, средний уровень звукового давления в частотной полосе при работающем источнике шума рассчитывается по формуле:

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \overset{\circ}{\mathbf{a}} \overset{N}{\underset{i=1}{\prod}} 10^{0,1L_{pi}} \right), \quad (1.30)$$

где L_{pi} – уровень звукового давления, измеренный в i -й точке измерения, дБА;

N – число точек.

Средний уровень звука L_p'' , дБА, средний уровень звукового давления в частотной полосе при неработающем источнике шума (фоновый шум) рассчитываются по формуле:

$$L_p'' = 10 \lg \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1L_{pi}''} \right), \quad (1.31)$$

где L_{pi}'' – уровень звукового давления фонового шума, измеренный в i -й точке измерения, дБА;

N – число точек.

Определяем коррекцию на фоновый шум:

$$K_1 = -10 \lg(1 - 10^{-0,1VL}), \quad (1.32)$$

где $VL = L_p' - L_p''$.

Если $\Delta L > 15$ дБ, то коррекцию не рассчитывают и ею пренебрегают. Если $\Delta L \geq 6$ дБ, то измерения обеспечивают точность технического метода, если $\Delta L < 6$, то следует поставить значение K_1 равное 1,3 дБ.

Рассчитываем средний на измерительной поверхности уровень звука или уровень звукового давления в частотной полосе с учетом коррекции на фоновый шум и акустические условия окружающей среды:

$$L_{pf} = L_p' - K_1 - K_2. \quad (1.33)$$

Результаты значений округляются до ближайшего значения, кратного 0,5 дБ.

Для проведения измерений используется оборудование с достаточной разрешающей способностью и имеющее свидетельство о поверке. Предпочтительным оборудованием являются интегрирующие шумомеры и вспомогательное оборудование, включая микрофон и кабель, которое должно отвечать требованиям для прибора 1-го класса по ГОСТ 17187.

Для проведения измерений можно использовать шумомер-анализатор спектра, виброметр портативный ОКТАВА-110А, который предназначен для измерения среднеквадратичных, эквивалентных и пиковых уровней звука, скорректированных уровней виброускорения, а также октавных и третьоктавных уровней звукового давления и виброускорения. С помощью данного прибора можно оценить влияние звука, инфра- и ультразвука, вибрации на

человека на производстве, в жилых и общественных зданиях, определить акустические характеристики механизмов и машин, а также выполнять научные исследования. Внешний вид прибора представлен на рис. 1.8. Прибор поставляется в комплектации:

- предусилитель микрофонный КММ400;
- микрофонный капсюль ВМК-250.

Для того чтобы различить физические измерения звукового давления в децибелах (дБ) (без частотных коррекций) от измерений, произведенных с помощью одной из заданных стандартных частотных характеристик А, В, С, принято международное соглашение о том, что результаты последнего вида измерений должны быть выражены в виде уровней звука с использованием шкалы децибел и указанием вида частотной корректирующей характеристики А, В, С. Если, к примеру, шум измеряется с использованием коррекции А, то результат должен быть представлен в виде дБА.



Рис. 1.8. Прибор для измерения шума и вибрации ОКТАВА-110А

Отсутствие грубых ошибок измерений проверяется методом Грэмбса. Проверка производится для объекта, имеющего максимальные значения уровней звукового давления, из следующего условия:

$$B_n = \frac{\bar{L}_i - \bar{L}_{ni}}{s_i} \quad (1.34)$$

где \bar{L}_i – среднеарифметическое значение уровня звукового давления в i -й октавной полосе частот для n объектов, дБ;

\bar{L}_{ni} – значение уровня звукового давления в i -й октавной полосе частот для каждого из n объектов, дБ;

n – исходное число объектов;

s_i – среднеквадратическое отклонение уровня звукового давления в i -й октавной полосе частот для n объектов, дБ (табл. 1.4):

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{L}_i - \bar{L}_{ni})^2}. \quad (1.35)$$

Таблица 1.4

Значение безразмерной величины B_n в зависимости от числа объектов измерения n для доверительной вероятности $P = 0,95$

N	3	4	5	6	7	8	9	10
B_n	1,41	1,2	1,16	2,13	2,2	2,3	2,46	2,54

Предварительную оценку достоверности исходного числа объектов можно выполнить упрощенным способом по коэффициенту вариаций из условий:

$$W = \frac{s_i}{L_i} 100 \% \leq 20 \%. \quad (1.36)$$

Если вышеуказанное условие не соблюдается, то число объектов следует удвоить.

Ошибка измерений в дБ определяется:

$$DL = t_n \frac{s_i}{\sqrt{n}}, \quad (1.37)$$

где t_n – коэффициент Стьюдента, определяемый по табл. 1.5.

Таблица 1.5

Значение коэффициента Стьюдента в зависимости от числа объектов измерения при доверительной вероятности

n	3	4	5	6	7	8	9	10
t_n	4,3	3,2	2,6	2,6	2,4	2,4	2,4	2,3

Истинное значение находится в интервале:

$$\bar{L}_i - t_n \frac{S_i}{\sqrt{n}} \leq L_i \leq \bar{L}_i + t_n \frac{S_i}{\sqrt{n}}. \quad (1.38)$$

Полученное значение сравнивается с нормативными значениями уровня звукового давления.

Если для исследуемых объектов измерения известна погрешность измерений, то для получения статистически достоверных акустических характеристик можно ограничиться измерением 1–2 объектов, приписав им известную погрешность. При измерении эффективности средств защиты от шума доверительную вероятность более целесообразно принимать равной 0,68 (табл. 1.6).

Определенное большим количеством измерений среднеквадратическое отклонение составляет $a = 3$ дБ. Используя нормальный закон распределения, можно найти доверительный интервал.

$$D_{\text{эф}} = t_n \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (1.39)$$

где N – число испытываемых средств шумозащиты;

t_N – коэффициент Стьюдента.

Таблица 1.6

Значения t_N в зависимости от числа измеряемых средств защиты N при доверительной вероятности $P=0,68$

N	3	4	5	6	7	8	9	10
t_N	1,25	1,19	1,16	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09

Для обычного числа измерений $N = 3$ ошибка измерений эффективности средств защиты не превышает 2,5 дБ.

1.4. Результаты экспериментальных исследований

Первая серия измерений уровня шума и вибрации проводилась на испытательном стенде в УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», в процессе измерения фиксировались октавные уровни звукового давления согласно схеме измерений и октавные уровни виброускорения. Поскольку нормируемые уровни шума определяются виброскоростью, то уровни виброускорения пересчитывались в уровни виброскорости по известной формуле:

$$L_v = L_w + 60 - 20 \lg f, \quad (1.40)$$

где L_v – уровни виброскорости, дБ;

L_w – уровни виброускорения, дБ;

f – среднегеометрические частоты, Гц.

Измерения проводились для двигателя Д-243 у пульта управления и около двигателя (рис. 1.9).

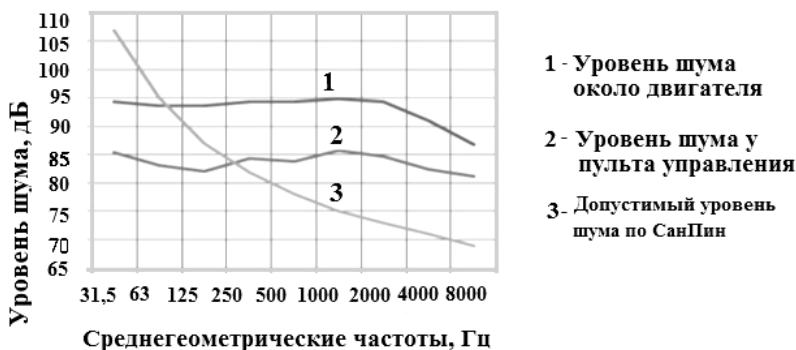


Рис. 1.9. Измеренные уровни шума для двигателя Д-243

Измеренные значения в среднеоктавных интервалах частот показали, что наибольшее превышение уровней шума приходится на средние и высокие частоты. По сравнению с предельными допустимыми значениями среднеоктавный уровень шума у пульта превышает на 8 дБ, а при измерениях непосредственно возле обкатываемого двигателя при режиме горячей обкатки под нагрузкой уровень шума превышает допустимые значения на 21 дБ.

Проведены измерения уровней шума при обкатке ремонтируемых автотракторных двигателей ЯМЗ-238 и Д-260 на различных режимах на ДП «Слонимский мотороремонтный завод» с боксовой системой размещения обкаточно-испытательных стендов. Данные представлены на рис. 1.10.

Проводили измерение уровня шума и для двигателей ЯМЗ-238, Д-260 (см. рис. 1.10).

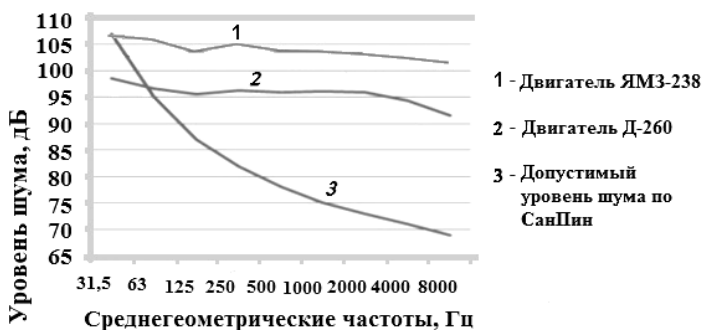


Рис. 1.10. Уровни шума при обкатке автотракторных дизелей

Из них наиболее шумным источником является двигатель ЯМЗ-238, превышение приходится на средние и высокие частоты. Среднеоктавный уровень шума для двигателя ЯМЗ-238 составляет 97 дБ, что на 17 дБ превышает допустимые уровни шума. Уровни шума для двигателя ЯМЗ-238 превышают предельно-допустимые значения в 8 октавах из 9, величины превышений составляют от 7 до 27 дБ.

Для изучения влияния шума от обкаточных стендов на работников соседнего участка (сборочный цех) в условиях ДП «Слонимский мотороремонтный завод» проводили измерение уровней шума при отсутствии на обкаточно-испытательном стенде ремонтируемых двигателей, а затем при одновременной обкатке двух ремонтируемых двигателей. Исследования проводились для двигателей Д-243 и Д-260 на горячем режиме обкатки под нагрузкой (табл. 1.7).

Среднеоктавный уровень шума на участке обкатки двигателей при отсутствии обкатываемых двигателей составляет 83 дБ, что выше среднеоктавного допустимого значения на 3 дБ, превышение приходится в основном на средние и высокие частоты 250–8000 Гц. В случае стендовой обкатки одновременно двух автотракторных двигателей Д-243 и Д-260 уровень шума возрастает по сравнению с допустимым уровнем шума на 10 дБ, а на соседнем участке на 6 дБ.

Таблица 1.7

Результаты измерений уровней шума на участке обкатки и в сборочном цехе (соседний участок)

Место и условия измерения	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами									Среднеоктавный уровень, дБ
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Участок обкатки при отсутствии обкатываемых двигателей	85,1	84,3	83,5	83,9	83,2	82,4	81,9	80,5	79,8	83
Соседний участок (сборочный цех) при отсутствии обкатываемых двигателей	88,3	86,4	85,1	85,7	84,9	83,8	83,1	82,4	81,3	84
Участок обкатки при работающих двигателях Д-243, Д-260	95,5	92,9	91,4	90,5	90,1	89,7	89,1	88,5	87,4	90
Соседний участок (сборочный цех) при обкатке двигателей	94,2	87,6	86,1	86,4	85,9	85,1	84,6	84,1	83,5	86
Допустимый уровень звукового давления	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Проведены исследования уровня шума, создаваемого на участке обкатки одним двигателем Д-243 и двумя одновременно работающими двигателями Д-243 и Д-260 (табл. 1.8).

Среднеоктавный уровень шума, создаваемый одновременно двумя работающими автотракторными двигателями Д-243 и Д-260, превышает создаваемый одним двигателем Д-243 на 3 дБ и на 10 дБ допустимый уровень шума. Превышение приходится на средние и высокие среднегеометрические частоты 125–8000 Гц.

Для оценки времени воздействия и интенсивности шума, действующего на работника в момент обкатки, были проведены исследования на участке испытания Слонимского мотороремонтного завода с боксовой системой расположения обкаточно-испытательных стендов при обкатке ремонтируемых двигателей Д-243, Д-260, ЯМЗ-238.

Таблица 1.8

Измеренные уровни шума, создаваемого на участке обкатки одним двигателем Д-243 и двумя одновременно работающими двигателями Д-243 и Д-260

Условия измерения	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами									Среднеоктавный уровень, дБ
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Участок обкатки при отсутствии обкатываемых двигателей	85,1	84,3	83,5	83,9	83,2	82,4	81,9	80,5	79,8	83
Участок обкатки при работающем двигателе Д-243	89,8	89,4	88,5	88,9	88,1	87,4	87,2	86,3	85,2	88
Участок обкатки при работающих двигателях Д-243, Д-260	92,5	91,9	91,4	90,5	90,1	89,7	89,1	88,5	87,4	90
Допустимый уровень звукового давления	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Общий уровень звукового давления и уровень звукового давления в октавных полосах частот в контрольных точках в дБА:

$$\bar{L}_A = 10 \lg \overset{n}{\underset{i=1}{\overset{\circ}{\mathop{\text{a}}}}} 10^{0,1L_i - L_k}, \quad (1.41)$$

где L_i – средний квадратичный уровень звукового давления в октавных полосах частот, дБА;

L_k – скорректированная характеристика по шкале А, дБА.

Для источников непостоянного шума устанавливаются следующие требования (СанПин 2.2.4/2.1.8.10-32-2011 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки») $L_{eq} - 80$ дБА, для восьмичасового рабочего дня, $L_{Amax} -$ не более 110 дБА:

- эквивалентный скорректированный уровень шума в дБА:

$$L_{eqA} = 10 \lg \frac{1}{8} (t_1 10^{L_{Ai} 0,1L_i} + t_2 10^{L_{Ai} 0,1L_i}), \quad (1.42)$$

где t – время воздействия шума, ч;

L_{Ai} – средний эквивалентный уровень звука в контрольных точках в дБА;

L_i – средний квадратичный уровень звукового давления в октавных полосах частот.

При измерении шума микрофон устанавливался в местах нахождения оператора на уровне уха. В каждой точке проводились 3 измерения по 30 секунд каждое.

Наибольший уровень шума создает двигатель ЯМЗ-238, превышение приходится на весь частотный спектр. Среднеоктавный уровень шума для двигателя ЯМЗ-238 составляет 97 дБА, что на 17 дБА превышает допустимые уровни шума. Уровни шума для двигателя ЯМЗ-238 превышают предельно-допустимые значения в 8 октавах из 9. Величины превышений составляют от 7 до 27 дБА, при этом максимальные величины превышений наблюдаются по всем октавным полосам. Для определения наиболее шумного режима обкатки ремонтируемого двигателя ЯМЗ-238 провели измерения уровней звукового давления на холодном, горячем без нагрузки и горячем под нагрузкой режимах. Данные измерений приведены на рис. 1.11.

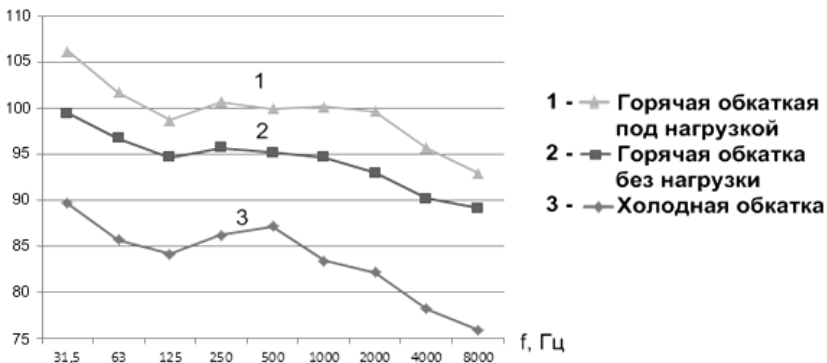


Рис. 1.11. Уровни звукового давления при обкатке ремонтируемого двигателя ЯМЗ-238

Анализ полученных данных показал, что наиболее шумным является режим горячей обкатки под нагрузкой. Среднеоктавный уровень звукового давления на режиме горячей под нагрузкой обкатки составляет 97 дБА.

В боксе с обкаточно-испытательным стендом и у пульта управления проводился хронометраж рабочего времени для того, чтобы определить, сколько времени и шум какой интенсивности воздействует на человека в процессе обкатки двигателя ЯМЗ-238 (табл. 1.9).

Таблица 1.9

Хронометраж рабочего времени при обкатке двигателя ЯМЗ-238

Место измерения	L_A , дБА	L_{max} , дБА	Время пребывания, ч
У двигателя при установке на стенд и снятии	82	90	0,9
У пульта	81	91	3,1
У двигателя со стороны 1–4 цилиндра, режим холодной обкатки	88	96	0,8
У двигателя со стороны 1–4 цилиндра, режим под нагрузкой обкатки	96	102	0,7
У двигателя со стороны 5–8 цилиндра, режим холодной обкатки	87	98	0,8
У двигателя со стороны 5–8 цилиндра, режим под нагрузкой обкатки	97	104	0,7
В боксе у двери	89	94	0,5

Из табл. 1.9 можно сделать вывод, что в процессе обкатки двигателя работник находится под воздействием непостоянного шума, эквивалентное значение L_A которого находится в пределах 81–97 дБА, максимальное значение шума L_{max} приходится на режим горячей обкатки под нагрузкой со стороны 1–4 цилиндра 104 дБА.

Для изучения распространения шума при стендовой обкатке автотракторных дизелей ЯМЗ-238 по измеренным данным, построили карту распространения шумовых полей в боксе. На рис. 1.12 изображен бокс со стендом для обкатки ремонтируемых автотракторных дизелей, пульт управления и обкатываемый двигатель.

Карта распространения шумовых полей показывает, что наибольшее распространение шума приходится со стороны выпускной системы двигателя и в направлении двери, через которую обкатываемый

двигатель подается в бокс обкатки. В момент обкатки двигателя среднеоктавный уровень шума в боксе непосредственно вблизи обкатываемого двигателя достигает 97 дБ, а уровень шума у пульта управления составляет 81 дБ.

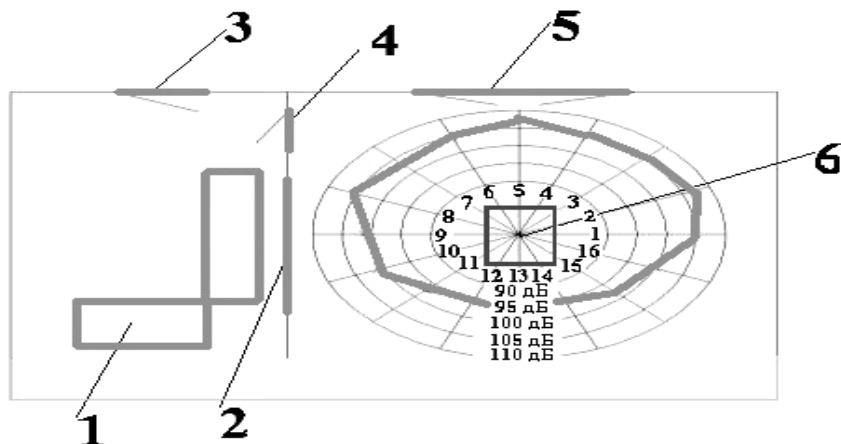


Рис. 1.12. Карта распространения шумовых полей при обкатке двигателя ЯМЗ-238:

- 1 – пульт управления обкаткой; 2 – смотровое окно; 3 – вход в комнату управления обкаткой; 4 – дверь из комнаты управления в бокс обкатки;
- 5 – дверь, через которую обкатываемый двигатель подается в бокс обкатки;
- 6 – обкатываемый двигатель

Недостаточная герметизация выпускной системы двигателя и двери, через которую двигатель подается в бокс обкатки, а также низкая звукоизолирующая способность ограждающих конструкций не обеспечивают защиту оператора от воздействия повышенного уровня шума не только у работающего двигателя, но и у пульта управления, находящегося за стеной от обкаточного стенда, что приводит к повышенной усталости работника и к снижению работоспособности и внимательности работника, что может привести к несчастному случаю или к развитию профессионального заболевания. Необходимо сократить продолжительность пребывания работника у обкатываемого двигателя, также требуется модернизация бокса для стендовой обкатки и контроль продолжительности нахождения оператора у работающего двигателя.

ГЛАВА 2

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОБКАТКИ ПРИ РЕМОНТЕ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

2.1. Значение и особенности обкатки двигателей при ремонте

Самыми дорогими, сложными и в то же время наиболее изнашиваемыми агрегатами автотракторной техники являются двигатели. На заключительном этапе изготовления или ремонта они проходят обкатку. В процессе обкатки происходит приработка пар трения, заключающаяся в формировании оптимальной для эксплуатации микро- и макрогеометрии поверхности, ее физико-механических свойств.

Приработка является неизбежным периодом работы трущихся сопряжений. Даже при отсутствии макроотклонений и волнистости поверхностей конкретного трибосопряжения и качественной сборки практически невозможно другими технологическими операциями обеспечить сложный комплекс формирующихся только при приработке и оптимальных для реальных режимов трения физико-химических характеристик поверхностного слоя материала.

Доказано, что независимо от первоначальной шероховатости, полученной при механической обработке, оптимальная, с точки зрения износа шероховатость, устанавливается только после приработки трущихся поверхностей сопряжения. Излишне малые размеры неровностей способствуют «схватыванию» поверхностей деталей при недостаточной их смазке и отклонениях в микрогеометрии [26].

В процессе исследования режимов приработки необходимо выявить сопряжения деталей, определяющих степень приработки двигателя и готовность его к нагрузкам в эксплуатационных условиях. Опытные данные показывают, что трущаяся пара «цилиндр – поршневое кольцо» по сравнению с другими узлами трения работает в наиболее сложных условиях. Эти условия приводят к появлению различных видов изнашивания – коррозионно-механическому, абразивному и другим, каждый из которых может быть характерным для тех или иных условий даже в различных цилиндрах одного двигателя. Особенно большая вероятность появления повышенных износов и повреждений (задиоров, заеданий и т. д.) возникает в этой паре в период начальной приработки из-за сравнительно грубой шероховатости поверхностей, нарушения их взаимного расположения и ухудшения условий смазки.

Такие ответственные пары трения как «поршень – гильза», «шейка коленчатого вала – вкладыш» работают хотя и при значительных давлениях, но находятся с точки зрения смазки в более благоприятных условиях.

Важно отметить, что во многих случаях шероховатость рабочих поверхностей вкладышей и шеек коленчатого вала в процессе приработки практически мало изменяется или даже увеличивается. Так, поверхность гильзы вновь изготовленного двигателя ЯМЗ-236 улучшается при приработке и достигает шероховатости 0,03–0,05 мкм, тогда как микрогеометрия вкладышей коленчатого вала находится в пределах $R_a = 0,17–0,20$ мкм до приработки, а после приработки $R_a = 0,20–0,28$ мкм. Среднеарифметическое отклонение микропрофиля, в свою очередь, для шеек коленчатого вала – 0,32–0,48 мкм до приработки и 0,39–0,55 мкм после приработки [29; 150].

Сложность заключается в том, что в период приработки протекают физико-химические и механохимические процессы, связанные с изменением тонких поверхностных слоев пар трения с возникновением специфических малоизученных вторичных структур. Соотношение между скоростями образования и разрушения вторичных структур характеризует приспособляемость материалов к изменению условий трения и зависит от интенсивности проявления механохимических процессов.

Процесс образования вторичных структур на поверхностях трения в условиях граничной смазки оказывает влияние на период приработки испытываемых образцов. Выраженные границы окончания приработки наблюдаются для температур 100–180 °С, причем продолжительность периода приработки с понижением температуры в этой области увеличивается.

Аналогичные области с максимальной скоростью образования вторичных структур получены при изменении осевой нагрузки и скорости скольжения. На скорость образования вторичных структур влияние нагрузки сказывается изменением глубины деформации поверхностного слоя, поэтому при превышении оптимального значения, период приработки увеличивается. При скорости скольжения меньше 0,11 м/с условия образования вторичных структур снижаются. С увеличением скорости период приработки по аналогии с нагрузкой и температурой масла также уменьшается. Механизм образования вторичных структур характеризуется периодами зарождения, увеличения толщины слоя и его упрочнения, дальнейшего растрескивания и разрушения [28].

Разработка и внедрение более современных конструкционных и смазочных материалов способствуют повышению начальной несущей способности и улучшению других триботехнических показателей начального (до приработки) качества трущихся сопряжений. Однако выполнение требования технического прогресса по повышению эффективности и снижению материалоемкости конструкций невозможно без интенсификации рабочих процессов двигателя, приводящей к дальнейшему повышению нагрузок, скоростей и т. п., что, в свою очередь, обуславливает возрастающую роль приработки трущихся сопряжений [29].

Обкатка, как технологический процесс, (рис. 2.1) начинается на ремонтном предприятии и заканчивается в эксплуатационных условиях.

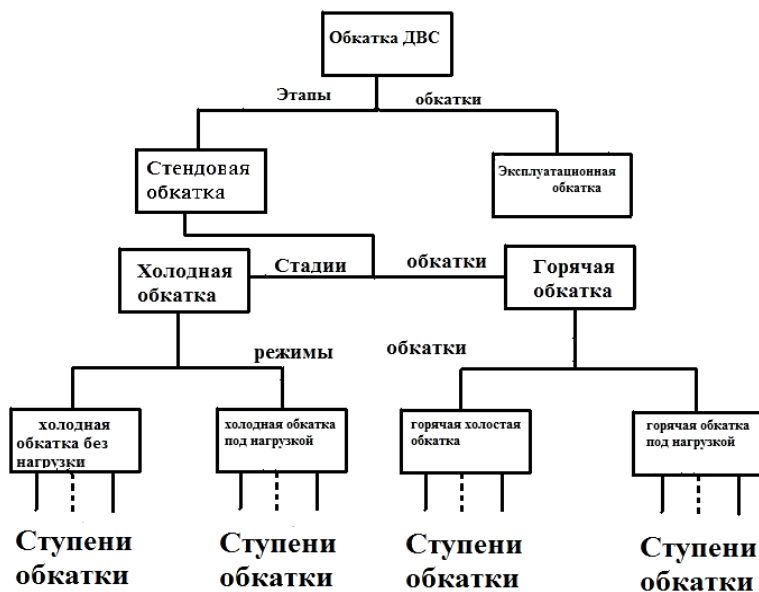


Рис. 2.1. Структура технологического процесса обкатки двигателей

Данной операцией достигается подготовка поверхностей деталей к восприятию эксплуатационных нагрузок, выявляются и устраняются отказы, возникающие из-за низкого качества запасных частей, нарушения технологии ремонта деталей, сборки сопряжений и узлов двигателей.

Кратковременной стендовой обкаткой достигается лишь приближение микрогеометрии деталей к их оптимальным, с точки зрения эксплуатации, значениям. При этом происходит некоторое увеличение опорной (несущей) поверхности деталей за счет снятия микронеровностей, но до степени, достаточной для сохранения прочной устойчивой масляной пленки между трущимися поверхностями, предотвращающей образование задиров, и способной к восприятию эксплуатационных нагрузок. В большинстве случаев оптимальная микрогеометрия устанавливается после завершения макрогеометрической приработки поверхностей трения в эксплуатационных условиях.

Одна из причин, снижающих эксплуатационную надежность двигателей, – недостаточный уровень технологического процесса обкатки на ремонтных предприятиях и в мастерских: использование нерациональных технологий; несоблюдение режимов обкатки; отсутствие объективных методов оценки качества приработки сопряжений; недостаток современных испытательных стендов, обкаточных масел и присадок; плохие санитарно-гигиенические условия труда слесарей-обкатчиков и др. [30, 31].

Для достижения качественной приработки трущихся поверхностей деталей двигателей требуется продолжительное время, которое зависит, прежде всего, от качества обработки деталей и качества сборки. Моторостроительные и мотороремонтные предприятия не в состоянии доводить обкатку до конца и ограничиваются временем 0,5–5 часов.

У отремонтированных двигателей по сравнению с новыми большая продолжительность обкатки (в 1–2,8 раза) и примерно в 2 раза больше этапов обкатки, а нагрузки на последних этапах составляют не более 80–90 % от номинальной. Частоты вращения коленчатых валов для обеих групп двигателей на всех этапах мало отличаются, составляя в конце холостой работы и обкатки под нагрузкой 90–100 % от номинальной.

В результате несоблюдения режимов обкатки двигателей увеличиваются начальные износы. Профессор Г. П. Шаронов [32, с. 7], например, указывает, что при начальной работе двигателей без ограничения числа оборотов наблюдается увеличение интенсивности изнашивания в 1,5–2 раза и уменьшение общего срока службы деталей цилиндропоршневой группы на 30–35 % по сравнению со сроком

службы деталей нормально приработанного двигателя. Аналогичные результаты получены и И. Б. Гурвичем [33, с. 33], который показал, что период приработки деталей двигателя требует особого внимания, поскольку именно в этот период вследствие повышенных удельных давлений в сопряжениях деталей, отсутствия стабильности зазоров и целостности масляной пленки возможно возникновение задиров и преждевременного износа поверхностей трения деталей двигателя.

Например, минимальное значение зазора между вкладышем и шатунной шейкой коленчатого вала двигателя ЯМЗ-238НБ равно 76 мкм, а максимальное 126 мкм (допуск посадки – 50 мкм). При увеличении этого зазора на 200 мкм появляется стук шатунного подшипника, и двигатель снимается с эксплуатации. За время приработки зазор в подшипниках должен увеличиться на минимальную величину, а в лучшем случае не измениться [5].

При ремонте общепризнана трехстадийная обкатка двигателей, состоящая из холодной приработки, приработки на холостом ходу и под нагрузкой. В течение холодной приработки происходит интенсивное изменение геометрических характеристик поверхностей с большими удельными износами, которые могут достигать до 70% за весь обкаточный период. В связи с этим проведению холодной приработки рекомендуется уделять особое внимание, стремясь по возможности снизить присущие ей значительные износы.

Характерно, что некоторые предприятия вообще не производят холодной приработки или проводят ее с заметными сокращениями по продолжительности. Ускорения и высокого качества приработки можно достичь при проведении ее на малых скоростях скольжения деталей [34, с. 117; 35].

Приработка двигателей на холостом ходу как самостоятельная стадия считается малоэффективной. Ее следует проводить лишь в течение времени, достаточного для прогрева и подготовки двигателя к обкатке под нагрузкой.

По мнению большинства исследователей, обкатка под нагрузкой является обязательным условием получения высокого качества приработки деталей и полной подготовки поверхностей трения к восприятию эксплуатационных нагрузок. Основным условием назначения режимов обкатки является обеспечение приращения нагрузок в основных сопряжениях по времени обкатки [10; 32, с. 170; 35].

Величины и характер изменения нагрузок в процессе приработки для каждой модели двигателей различны и лежат в довольно

широких пределах. Многие заводы при приработке под нагрузкой изменяют частоту вращения коленчатого вала от 500–1000 мин⁻¹ до номинальной с предельной нагрузкой 85–100 % от эффективной мощности. Согласно [36, с. 72], приработка под нагрузкой должна производиться при номинальной частоте вращения с постепенным увеличением нагрузки до величины, соответствующей номинальной мощности двигателя.

Приработку ДВС можно производить с применением как ступенчатого, так и бесступенчатого изменения нагрузки и частоты вращения. Вопрос о наиболее выгодной динамике изменения этапов приработки является дискуссионным. Некоторые исследователи [37, с. 23; 36, с.90] указывают на ускорение приработки и улучшение качества поверхностей трения в условиях бесступенчатого нагружения, но большинство авторов [27, с. 11; 38; 39, с. 94, табл. 4.34; 32, с. 196, табл. 27 и 28; 29] рекомендуют ступенчатое.

Проведенные исследования показали, что при переменных режимах работы дизеля интенсивность износа его основных деталей цилиндра-поршневой группы (ЦПГ) в 1,3–3 раза выше, чем при работе на установившемся режиме [40; 41, с. 8].

Из анализа литературных источников и результатов выполненных исследований выделены следующие основные факторы, влияющие на приработку деталей и скорость изнашивания на переменных режимах работы двигателя [41, с. 8]:

1. Нарушение режима смазки в сочетании с изменением подачи ее к трущимся парам.
2. Неравномерность распределения температур по окружности гильзы, вследствие чего возникает деформированность деталей ЦПГ.
3. Дополнительные силы инерции, возникающие на переменных режимах.
4. Коррозионно-механическое изнашивание за счет пониженного теплового состояния двигателя.

Экспериментальные исследования, выполненные на двигателе ЯМЗ-238, показали, что пиковые значения тепловых потоков через тепловоспринимающую поверхность днища на неустановившемся режиме в 2,5 раза превосходят значения на установившихся режимах. Аналогично изменению тепловых потоков изменялись температурные градиенты и напряжения [42, с. 147].

Противоречивые данные исследований можно объяснить конструктивным различием обкатываемых типов двигателей и воздействием

многочисленных факторов на процесс приработки. Поэтому выбор методов приработки должен проводиться применительно к каждому типу двигателей в зависимости от его конструктивно-технологических особенностей и условий ремонта [8, с. 44, 43].

Некачественная приработка поверхностей трения, т. е. наличие задиры, местных зон перегрева, очагов коррозионного износа, неравномерного контактирования трущихся поверхностей и т. д., приводит к уменьшению долговечности двигателя. Зависимость показателей надежности и долговечности двигателя от его стендовой обкатки исследовались в ряде работ, но обилие факторов, влияющих на износ деталей и сопряжений в условиях эксплуатации, не позволяет получить обстоятельных расчетных методов определения степени этого влияния. Исследованиями [44, с. 64; 27; 45, с. 37] подтверждено, что за счет качественного проведения обкатки на ремонтных предприятиях межремонтный срок службы двигателей увеличивается на 8–36 %.

Долговечность двигателей в значительной мере зависит от того, насколько правильно проведена их обкатка. Установлено, например, что при обкатке на рационально подобранном масле с необходимой присадкой и продолжительностью износ деталей в эксплуатации снижается на 35–40 % по сравнению с такими же двигателями, для которых не был выдержан режим обкатки [46; 47, с. 52].

Принципиально важен вопрос о времени, необходимом для обкатки, т. к. нередко на различных предприятиях продолжительность обкатки даже однотипных двигателей неодинакова, что вызвано главным образом разницей в режимах обкатки. Выбор режима, обеспечивающего сокращение длительности обкатки за счет интенсификации процесса приработки до пределов, при которых не образуются задиры и не происходит заедания деталей, до настоящего времени является трудной проблемой [48, с. 125].

Выбранные на заводе наиболее рациональные режимы приработки новых двигателей вместе с улучшением микро- и макрогеометрии деталей позволили существенно повысить качество приработки и существенно сократить продолжительность заводской обкатки дизелей ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238 с 160 до 75 минут [26, с. 175], а в дальнейшем и до 40 минут [49, с. 26].

Из вышесказанного можно сделать вывод, что обкатка играет весьма важную роль в повышении надежности и улучшении эксплуатационных и экономических показателей двигателей внутреннего

сгорания. Поэтому требуется разработка методов, сокращающих ее продолжительность без ухудшения качества приработки трущихся поверхностей деталей.

2.2. Показатели качества приработки

Изучению процессов приработки деталей ДВС посвящено много работ, в которых содержится значительный объем информации по различным аспектам рассматриваемой проблемы [50, 33, 35, 51, 36, 45].

Значительным достижением в области процессов приработки явились исследования ученых Р. Т. Абдрашитова, В. А. Белого, И. З. Варшавского, Л. М. Гаенко, Д. Н. Гаркунова, В. Г. Головатенко, М. А. Григорьева, Н. С. Ждановского, В. Г. Заренбина, В. П. Иванова, В. И. Казарцева, А. И. Калимова, И. И. Карасика, В. И. Кольченко, Б. И. Костецкого, И. В. Крагельского, П. М. Кривенко, В. М. Михлина, Е. М. Мухина, С. С. Некрасова, М. Х. Нигаматова, А. В. Николаенко, П. И. Носихина, И. П. Погорелого, Н. З. Савченко, И. И. Столярова, В. В. Стрельцова, А. К. Трубилова, Н. В. Храмцова, И. Е. Ульмана, В. А. Успенского, В. И. Цыпщина и др.

В результате этих работ определены оптимальные шероховатости трущихся поверхностей, найдены способы сокращения продолжительности приработки, выявлена роль смазочного масла и отдельных присадок к нему, проведены расчетные исследования режимов обкатки, раскрыты некоторые механизмы физико-механических и химических явлений, происходящих в узлах трения двигателей.

Но до настоящего времени не рассмотрены в комплексе все факторы, влияющие на приработку поверхностей трения в процессе обкатки двигателей. Это существенно снижает эффективность планирования эксперимента при исследовании приработки, затрудняет обработку экспериментальных данных.

Классификация факторов, влияющих на приработку трущихся поверхностей деталей двигателя в процессе обкатки, приведена на рис. 2.2.

Факторы, влияющие на приработку трущихся поверхностей деталей двигателя в процессе обкатки, можно разделить на четыре основные группы:

1 – факторы, зависящие от свойств материалов трущихся поверхностей деталей обкатываемого двигателя, применяемых присадок, масел, охлаждающей жидкости, смазок и т. д.;

- 2 – факторы, зависящие от процесса обработки примененных материалов при изготовлении и сборки деталей;
- 3 – факторы, зависящие от окружающей среды;
- 4 – факторы, зависящие от технологии обкатки двигателя.

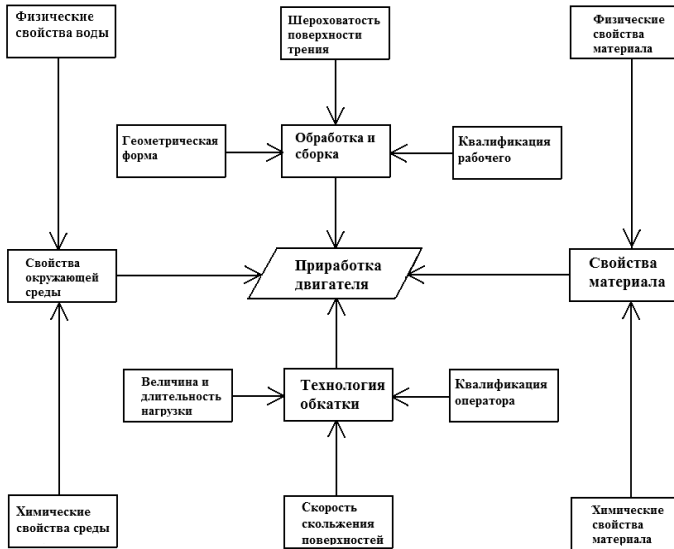


Рис. 2.2. Классификация факторов, влияющих на приработку трущихся поверхностей деталей двигателя в процессе обкатки

Работы ряда исследователей в области обкатки двигателей [52, с. 126, 53, с. 138, 148, с. 9] позволили выделить важнейшие факторы, влияющие на приработку поверхностей трения деталей обкатываемого двигателя. К ним относятся:

- из первой группы принятой классификации факторов: физические и химические свойства поверхностей трения деталей обкатываемого двигателя, применяемых присадок и масел;
- из второй группы: шероховатость поверхностей трения деталей, макрогеометрические отклонения от идеальных геометрических форм, квалификация и обеспеченность рабочих инструментом, приспособлениями;
- из третьей группы: химические и физические свойства окружающей среды (конструкция системы очистки и подачи масла, системы охлаждения, температура воды и масла, санитарно-гигиенические условия труда и т. д.);

- из четвертой группы: изменение во времени величины нагрузок и скорости вращения коленчатого вала двигателя, продолжительность обкатки на заданном режиме, квалификация оператора и наличие обкаточно-испытательного стенда, позволяющего задавать и поддерживать требуемые режимы обкатки.

Известно, что основные рабочие параметры двигателей (мощность механических потерь, удельный расход топлива, расход масла на угар, прорыв газов в картер двигателя) в период приработки улучшаются вследствие уменьшения микронеровностей, макрогеометрических отклонений и формирования оптимальных физико-механических свойств поверхностей трения [52, с. 126].

В процессе приработки сопряжений необходимо обеспечить упругопластическое деформирование микровыступов поверхностей в сочетании с разрушением когезионных связей в тонком поверхностном слое металла. Это возможно при образовании на поверхности трения хорошо закрепленного, но менее прочного слоя, чем основной металл. Подобный эффект возможен при нанесении на основную поверхность слоя пластичного мягкого материала или в результате взаимодействия смазки с основным металлом. В первом случае это обеспечивается нанесением прирабочных покрытий, во втором – реализуется в избирательном переносе.

Необходимые условия избирательного переноса: материал поверхности не должен наклепываться, но иметь способность к сдвигообразованию; отсутствие оксидных пленок в зоне трения; способность частиц, отделившихся с одной поверхности схватываться с сопряженной поверхностью; сами частицы должны обладать высокой пластичностью [10].

Долговечность и безотказность деталей значительно повышаются при применении эффекта избирательного переноса при трении, с появлением которого на трущихся поверхностях в зоне контакта самопроизвольно образуется металлоплакирующая пленка – неокисляющаяся тонкая металлическая пленка с низким сопротивлением сдвигу. Узел трения в режиме избирательного переноса работает подобно узлу, смазываемому жидким металлом. Благодаря созданию металлоплакирующей пленки, разделяющей трущиеся поверхности даже при высоких нагрузках, износ деталей в условиях избирательного переноса может быть снижен до нуля (эффект безысности), а коэффициент трения – до значений при жидком трении.

Эффект избирательного переноса достигается введением металлоплакирующих присадок в масла, нанесением на рабочие поверхности деталей слоя цветного металла, финишной антифрикционной безабразивной обработкой (ФАБО), установкой вставок в детали или деталей (поршневое кольцо) из цветных металлов. Порошковые металлоплакирующие препараты в качестве основного компонента содержат ультрадисперсные порошки, а ионные – полностью маслорастворимые соли пластичных металлов и жирные кислоты. В качестве плакирующих металлов используются медь, хром, алюминий, олово, цинк, железо, свинец, фосфор и серебро, а в качестве органических кислот – олеиновая и некоторые другие [150, с. 138, 47]. Прирабатываемость вкладышей к шейкам коленчатого вала и стабилизация момента его поворота при этом достигаются значительно быстрее, чем при традиционной обкатке [5].

Улучшить антифрикционные и противозадирные свойства поверхностей трения можно эпиламированием, т. е. нанесением на защищаемые поверхности эпиламов – молекулярных пленок [54].

Однако эти методы имеют некоторые недостатки и ограничения в использовании. Толщина слоя наносимого металла при ФАБО (1–2 мкм) и эпиламирующего состава (4–8 нм), весьма эффективная в начальный период работы, оказывается недостаточной при длительной эксплуатации двигателя, когда радиальный износ гильз цилиндров достигает 100–150 мкм и более.

Металлопорошковые добавки имеют низкую седиментационную стойкость и ограниченность интервала скорости, нагрузки и температуры работы их пар трения [55].

В настоящее время в странах Западной Европы и США применение в моторных маслах присадок с фторсодержащими материалами существенно ограничивается из-за образования в отработавших газах ядовитых химических соединений [56].

Установка вставок из цветных металлов возможна лишь в большие по высоте поршневые кольца двигателей большой размерности, и этот метод практически неприменим для автотракторной техники, у которой высота поршневого кольца в большинстве случаев не превышает 3 мм, а долговечность деталей из цветных металлов часто оказывается недостаточной при тяжелых режимах работы [145].

Экспериментальными данными установлено, что система «гильза–кольцо–поршень» в широких пределах способна самонастраиваться, поддерживая нормальное протекание процессов трения и

износа. Однако в отдельных случаях при достижении и превышении критических параметров, например, высоких контактных давлений на кромках деталей, может наступить саморасстройка системы с последующим задиrom трущихся поверхностей. Самонастройка системы осуществляется путем формообразования поверхностей трения при приработке в результате комплексного воздействия на них переменных газовых и инерционных сил, сил трения, качаний поршня в цилиндре, термических деформаций и профиля кольцевой канавки.

Среди других конструкционных мероприятий, направленных на ускорение и улучшение приработки, следует отметить применение бочкообразных овальных поршней, повышение равномерности температурного поля и снижение теплонапряженности деталей, разработку форм колец, улучшающих их приспособляемость к деформациям цилиндра [30].

К технологическому направлению относятся следующие мероприятия: повышение точности изготовления и сборки сопряженных деталей и узлов; применение совершенных способов обработки поверхностей трения; нанесение электромагнитной наплавкой, плазменным напылением, лазерной обработкой, химическим и электрохимическим способами различных покрытий; использование обработанных топлив, масел и масел с присадками. В этом направлении проведены многочисленные исследования и выявлены эффективные мероприятия [50; 35; 3; 57, с. 10; 58; 59].

Опыт эксплуатации дизелей и данные исследований свидетельствуют о том, что искажения геометрической формы и правильного расположения поверхностей трения вызывают повышенный и неравномерный износ деталей и задиры в узлах трения, что может привести к аварийным ситуациям [52, с. 127, 60, с. 194]. Несоосности, неперпендикулярности, особенно деталей кривошипно-шатунного механизма, существенно удлиняют время приработки и увеличивают начальный износ [61, с. 9].

В то же время, как показывают отдельные исследования [62, с. 14], неизбежные в работе допустимые нарушения правильного взаимного расположения поверхностей деталей и их осей могут улучшать протекание процессов приработки. Экспериментально установлено, что перекося поршня в пределах зазора по гильзе способствует вращению (проворачиванию) кольца в канавке, т. е. создает условия,

при которых наблюдается более равномерный, следовательно, и пониженный износ. В период приработки поршневые кольца вращаются, причем по мере приработки интенсивность проворачивания уменьшается. Когда приработка заканчивается, кольца перестают вращаться.

Ускорению и улучшению прирабатываемости поверхностей трения способствуют соответствующие виды их обработки [57, с. 11; 62].

Микропрофиль поверхности при антифрикционно-деформационном хонинговании (АДХ) формируется пластическим деформированием микровыступов, получаемых на предыдущей операции хонингования. При этом величина деформации микронеровностей должна обеспечивать требуемые параметры микрогеометрии поверхности, не превышать высоту шероховатого слоя исходного профиля и допустимых предельных значений для обрабатываемого материала.

Обработка гильз цилиндров двигателей методом АДХ по сравнению с обработкой плосковершинным хонингованием (ПВХ) сокращает время приработки в паре кольцо – гильза в 2 раза и повышает ресурс работы гильз в 1,9–2,6 раза; оптимальные значения технологических параметров процесса АДХ, установленные при выполнении лабораторных исследований и ходовых испытаний двигателей, совпадают [63, с. 216].

Хорошо зарекомендовали себя способы обработки гильз цилиндров методом вибрационного обкатывания с последующим сульфидированием или поверхностной пластической деформации с одновременным нанесением медного покрытия толщиной 1–3 мкм, обеспечивающие получение упрочненного поверхностного слоя с антифрикционным покрытием, в 2,8 раза снижающими начальный износ и сокращающими время приработки двигателя [147].

Для ускорения приработки сопряжений двигателей предлагается пропускать электрический ток через детали или намагничивать их. Известен способ приработки двигателей, заключающийся в том, что при проворачивании коленчатого вала между деталями пропускают переменный электрический ток и прокачивают водный раствор электролита.

Однако из-за низкой несущей способности электролита и рассеивания электрического тока продолжительность процесса приработки сравнительно велика, имеет место излишний съем металла и формируются поверхности, обладающие невысокой износостойкостью.

Приработка отремонтированных двигателей на ряде ремонтных предприятий осуществляется пропуском постоянного электрического тока через пары трения [61, с. 46; 64, с. 20]. При холодной обкатке выпрямленное напряжение 0,8–1,2 В подается в течение 25 мин через токосъемник на коленчатый вал дизеля, величина тока 3–5 А. Но в связи с тем, что получение оптимального рельефа и структуры поверхностных слоев в основном происходит в процессе горячей обкатки, а электрический ток пропускается только в режиме холодной обкатки, он не оказывает существенного влияния на процесс полной приработки. Наряду с незначительным увеличением микротвердости поверхностей и снижением шероховатости при применении электрического тока возрастает начальный износ сопряжений.

Магнитное состояние поршневых колец существенно влияет на скорость их изнашивания. Средний весовой износ намагниченных колец в несколько раз меньше износа ненамагниченных, в то же время износ гильз цилиндров при работе в паре с намагниченными и ненамагниченными кольцами практически одинаковый [62, с. 88].

Значительный интерес представляют исследования, посвященные изучению влияния на приработку двигателей присадок к маслам, топливу и воздуху [50; 47; с. 63; 45; 56]. Из присадок, ускоряющих приработку за счет интенсификации абразивного износа, следует отметить присадки, содержащие органо-минеральные вещества, вводимые в дизельное топливо. Сгорающая, растворимая в топливе соединения металлов превращаются в мелкодисперсные абразивные частицы.

Использование методов ускорения приработки, например, топлива с элементоорганическими присадками, повышает качество приработки на момент окончания технологической обкатки ценой некоторого увеличения износа деталей цилиндропоршневой группы и особенно верхней части цилиндра, как правило, лимитирующей ресурс деталей в целом [146; 39, с. 33]. При этом на распылителях образуются отложения, ухудшающие производительность форсунок, нарушается процесс сгорания и происходит падение мощности дизеля. Прямое введение в смазочное масло мелкодисперсной абразивной присадки (например, специально подготовленный каолин) не нашло в производстве широкого применения ввиду загрязнения внутренней полости системы очистки масла, ловушек коленчатого вала и лабиринтов двигателя мелкими абразивами, которые в условиях эксплуатации могут продолжить износ деталей [61, с. 32].

Недостатком всех инактивных присадок является то, что они не оказывают активного действия на формирование необходимых физико-химических свойств поверхностных слоев трущихся деталей, поэтому после смены масла возникают дополнительные приработочные процессы [62, с. 41].

Ускорение приработки двигателей достигается применением специальных обкаточных и обкаточно-консервационных масел с введением в них химически активных и поверхностно активных веществ. Однако активные серосодержащие противозадирные присадки способствуют значительному повышению дальнейшего износа по сравнению с маслами без присадок [61, с. 19]. Наибольшим коррозионным воздействием на детали двигателя, особенно на шатунные вкладыши из свинцовой бронзы, обладает присадка ОГМ, наименьшим – масло М-10Г2 и ОМД [65, с. 10]. Учитывая усложнение технологии и увеличение затрат труда в ремонтном производстве, ставится под сомнение необходимость использования обкаточных масел с присадками серы при капитальном ремонте ДВС.

При обкатке после ремонта тракторных дизелей и агрегатов находят применение композиции АРВК, в состав которых входят базовая жидкость, серпентин (гидролизированный силикат магния) в виде твердого порошка с размером частиц 1–5 мкм и трибополимерообразующая присадка. Использование ее в составе масел позволяет сформировать высокие антифрикционные и противоизносные свойства в парах трения за счет трибополимерообразующей присадки и реализовать восстановительный эффект за счет серпентинита. Преимущественно антифрикционный, противоизносный или приработочный эффект обеспечиваются изменением соотношения компонентов композиции [66].

Поверхностно активные присадки способны понижать трение в большей мере, чем это может зависеть от вязкости масла. В то же время эти вещества являются дорогостоящими, снижают термоокислительную стабильность смазочных масел, обладают недостаточной растворимостью и имеют слабые противозадирные свойства из-за недостаточной прочности адсорбированных пленок, разрушающихся при температуре выше 150 °С.

Масла с присадками не обеспечивают хорошую смазку поверхностей трения в верхней зоне гильз цилиндров из-за задержки поступления масла, особенно длительной при пуске дизелей зимой.

Кроме применения вышеперечисленных мероприятий, направленных на ускорение и улучшение приработки, интенсификация этих процессов достигается выбором оптимальных и рациональных скоростных, нагрузочных и температурных режимов в условиях заводской приработки и начальной эксплуатации двигателей.

Выявлено, что влияние нагрузки двигателя на износ больше в 4–5 раз продолжительности обкатки и в 12–14 раз – частоты вращения коленчатого вала. Так же установлено, что с повышением нагрузки скорость износа возрастает, а с увеличением продолжительности обкатки и частоты вращения снижается [62].

Скорость приработки исследуемых пар зависит от качества промежуточной среды смазки, количества и рода абразива и режимного фактора (давление, скорость скольжения). Последний должен иметь максимальное значение, граничащее с предельным, при котором упругие деформации переходят в пластические. Так как в процессе приработки наблюдается изменение микронеровностей по высоте и радиусам закругления и соответствующее им снижение контактных напряжений, для сохранения заданного уровня скорости изнашивания необходимо периодически повышать внешнюю нагрузку. Оптимальным в процессе приработки является поддержание нагрузки в любой момент на уровне, приблизительно равном несущей способности [67, с. 352].

Чтобы обеспечить работоспособность в широком диапазоне эксплуатационных нагрузок, целесообразно прирабатывать к возможно большей нагрузке, т. е. добиться «субприрабатываемости».

Такое состояние можно получить приработкой в режиме на грани заедания. При этом субприрабатываемость поверхностей трения достигается как по наследственным (интенсивное пластическое деформирование и др.), так и диссипативным (высокие температурные градиенты и т. п.) компонентам совместно [29, с. 209].

Следует отметить, что автотракторные дизели после ремонта имеют значительный разброс параметров, поэтому и время приработки двигателей будет неодинаковым. Существующие режимы обкатки предусматривают продолжительность, обеспечивающую обкатку любого из отремонтированных автотракторных дизелей. Индивидуализация обкатки позволяет определить время окончания приработки двигателей и своевременно перейти на очередную ступень обкатки [68; 144, с. 139; 69].

Применение способов, ускоряющих процесс приработки, с еще большей остротой ставит вопрос о селективном установлении режимов обкатки каждого автотракторного дизеля, т. е. к обкатке двигателя в функции его технического состояния.

2.3. Анализ способов управления процессом обкатки и конструкций обкаточных стендов

Для управления процессом приработки поверхностей деталей двигателей в процессе послеремонтной стендовой обкатки необходимо иметь объективную информацию об их техническом состоянии. При этом большое значение имеют достоверность, оперативность и стоимость применяемого метода.

Современные способы управления процессом обкатки автотракторных дизелей (рис. 2.3) разнообразны. Для определения степени приработки двигателя в целом и отдельных его сопряжений используются различные методы контроля его технического состояния.

Приработка трущихся поверхностей деталей сопровождается усиленным трением и износом. По мере прирабатываемости трущихся поверхностей деталей трение и износ снижаются, а по окончании приработки стабилизируются. Изменения трения и износа в процессе обкатки сопровождаются соответствующими изменениями мощности механических потерь, определяемой по моменту прокручивания неработающего двигателя [70, с. 43; 69] давления масла в масляной магистрали [71, с. 8; 69], температур трущихся поверхностей деталей [71; 72, с. 38], количества и давления газов, прорывающихся из цилиндров в картер двигателя [73; 74, с. 46], удельного расхода топлива [62, с. 57; 149], количества металла в масле [75, с. 14; 76; 151] и др. Характер изменения этих и других показателей позволяет косвенно судить о качестве приработки трущихся поверхностей.

Критериями качества приработки сопрягаемых деталей, узлов и двигателя в целом может быть стабилизация по времени этих показателей, характеризующих техническое состояние обкатываемого двигателя.

Расширение исследований режимов приработки отремонтированных двигателей, поиск путей сокращения ее продолжительности с наиболее полным учетом специфики ремонтного производства возможны только при достаточно чувствительном непрерывном контроле процесса приработки трущихся пар деталей двигателя.

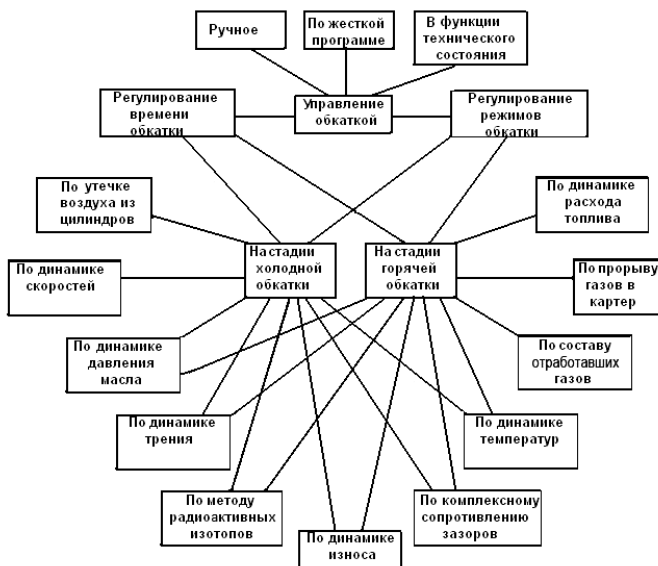


Рис. 2.3. Классификация способов управления процессом обкатки ДВС

К методам контроля должны быть предъявлены следующие основные требования: высокая чувствительность измерений и непрерывность контроля без разборки трущихся пар, минимальное время замера, обеспечение минимальных затрат на проведение исследований и возможность применения метода в стендовых испытаниях.

Определение динамики износа – трудоемкая и дорогостоящая операция. Показатели политроп сжатия и расширения трудноопределимы. Количество прорывающих в картер газов во многом зависит от случайных факторов (режимов работы и положения компрессионных колец). Значения расхода топлива, давления и температуры отработавших газов имеют относительно небольшой диапазон изменения за время обкатки.

Все известные методы измерения износа делят на группы, требующие разборки двигателя и не требующие ее. К первой группе относятся: микрометраж, взвешивание, профилографирование, метод искусственных баз. Возможности применения в процессе приработки методов первой группы ограничены как вследствие недостаточной чувствительности измерений, так и в необходимости разборки двигателей, исключающей непрерывный контроль процесса и приводящий к нарушению условий работы пар трения.

В практике испытаний широкое применение получили методы второй группы: определение износа по содержанию железа в масле – метод «железо в масле»; спектральный анализ и метод радиоактивных индикаторов [75, с. 11; 76, с. 42; 74, с. 129].

Содержание железа в пробе масла определяют калориметрическим, полярографическим, весовым и объемным методами. Недостатками этих методов являются их большая трудоемкость и оценка только интегрального относительного износа двигателей, ошибки в процессе отбора и анализа проб масла.

Результаты исследований показали, что использование спектрального анализа масел позволяет не только контролировать протекание процесса обкатки, но и проводить индивидуальную оценку качества их ремонта [77; 62, с. 62].

Метод спектрального анализа предназначен для определения в моторном масле элементов износа трущихся деталей, он обладает высокой точностью и позволяет определять износ любых поверхностей трения. Его использование также требует значительных затрат времени для отбора и выполнения анализа проб масла, поэтому не может быть использован для оперативного контроля за ходом непродолжительной стендовой приработки, но применим на стадии исследования и разработки алгоритма управления процессом обкатки [66; 76, с. 45; 78].

Метод радиоактивных индикаторов позволяет по сравнению с методом «железо в масле» повысить чувствительность измерений и получить быструю оценку результатов замеров. В то же время для его использования требуется сложная подготовка образцов, специальная измерительная аппаратура и принятие особых мер предосторожности.

Динамика изменения давления картерных газов достаточно отражает степень приработки трущихся поверхностей ЦПГ [73, с. 61; 45, с. 29]. Этот метод является безразборным, но может быть использован только на горячей обкатке и предназначен для контроля только ЦПГ.

Возможен контроль технического состояния обкатываемого двигателя на основе анализа виброинформации [46], по характеру акустической эмиссии и триботехническим процессам [79, с. 29].

Электрическое сопротивление трущейся пары также можно принять в качестве оценочного показателя приработки [61, с. 44; 28; 80]. Эти способы требуют сложного оборудования и большой подготовительной работы.

Аналогично можно отметить недостатки и других методов оценки, поскольку они предназначены для решения узких технических задач.

Из анализа большого перечня разнообразных методов видим сложность и нерешенность проблемы достоверности и оперативности оценки технического состояния двигателей в процессе послеремонтной стендовой обкатки.

Анализ опубликованных работ показывает, что большая их часть посвящена изучению отдельных сторон приработки двигателей и не полностью раскрывает сущность процессов, происходящих на трущихся поверхностях сопряженных деталей.

Сложная взаимосвязь и механизмы явлений при приработке автотракторных дизелей, их главные количественные характеристики до сих пор остаются невыясненными, а, следовательно, не созданы реальные возможности для направленного изменения процессов с целью оптимизации приработки. Это вызывает необходимость дальнейшего развития и углубления экспериментально-теоретических исследований данного процесса, в частности, решения задачи контроля технического состояния обкатываемого двигателя и определения его выходных параметров по начальным.

В работах [71; 72, с. 38] отмечено, что закономерности изменения износа и температур во многом аналогичны, причем кривая изменения температур масла с небольшим отставанием (разница в 10 градусов [61, с. 35, табл. 9]) повторяет кривую износа деталей. Проведенные авторами испытания подтвердили возможность существования подобной взаимосвязи, однако заметное изменение результатов измерения и влияние дополнительных факторов (температуры охлаждающей жидкости, перегрева отдельных деталей двигателя и т. д.) не позволяют рассматривать стабилизацию температур масла в качестве единственного надежного критерия окончания этапа приработки деталей двигателей [27, с. 58].

Непосредственно связаны с потерями от трения также температуры цилиндрических гильз, поршней и подшипников коленчатого вала, которые в процессе прокрутки двигателя электробалансирным динамометром растут пропорционально [81].

С возрастанием температуры воды и масла при всех частотах вращения коленчатого вала снижается мощность трения, что связано с некоторым уменьшением вязкости масла.

Испытания показали, что при постоянстве температуры воды температура смазочного масла служит индикатором условий трения подшипников коленчатого вала. Резкое возрастание температуры

смазочного масла в магистрале двигателя свидетельствует о неблагоприятных условиях приработки подшипников – возникновении схватывания и задигов вкладышей и шеек коленчатого вала. Возникновение этих явлений вызывает резкое увеличение температуры трения на локальных участках контактирующих поверхностей, и этот прирост температуры передается смазочному маслу.

Таким образом, как мощность механических потерь, так и температуры, возникающие при трении, могут служить критериями при оценке технического состояния двигателей [52, с. 127; 33].

При разработке метода определения окончания приработки по температуре масла двигатель должен рассматриваться как инерционный объект с постоянной времени нагрева двигателя, составляющей около 20 минут.

Постоянная времени будет для одного и того же типа двигателей различна при обкатке их на разных мотороремонтных заводах, так как она определяется не только конструкцией двигателя, но и конструкцией системы охлаждения. Поэтому переход с одной ступени обкатки на другую по стабилизации температуры масла в поддоне картера приведет к увеличению времени обкатки, а учет постоянной времени нагрева аппаратным методом требует разработки специальной методики и усложнения устройства управления [82].

На каждом этапе холодной приработки наблюдается снижение механических потерь и их стабилизация. Несмотря на некоторые колебания температуры масла и охлаждающей воды, приводящие к рассеиванию результатов, данные по механическим потерям указывают на необходимость исследования возможности сокращения длительности обкатки [27, с. 58].

Исследованиями М. М. Хрущова установлено, что «сопоставление повышения температуры в начале каждой приработки или длительности работы, необходимой для получения стабильного значения температуры при определенной нагрузке, позволяет дать испытанным материалам сравнительную оценку по их способности прирабатываться. Такую же оценку прирабатываемости можно давать по изменению момента трения» [83].

Наименьшее значение момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала наблюдалось у обкатанного дизеля, развивающего наибольшую мощность и имеющего наименьший расход топлива [74, с. 119].

Разработан метод определения окончания приработки по значению мощности механических потерь. Известно, что процесс приработки тесно связан с величиной механических потерь. Чем меньше механические потери у вновь собранного двигателя, тем легче происходит приработка его деталей и быстрее возрастает его эффективная мощность [84].

На примере двигателей ЯМЗ-238 НБ и СМД-62 выявлена тесная взаимосвязь между начальным износом и мощностью механических потерь. Увеличение износа металла в моторном масле на 100 граммов в тонне является следствием возрастания потерь на трение на 18–22 % [62, с. 65].

В начале приработки трение и износ заметно возрастают, затем по мере прирабатываемости деталей снижаются и при завершении приработки стабилизируются.

Таким образом, мощность механических потерь – не только параметр, требующий снижения, но и критерий подготовленности двигателя к восприятию рабочих нагрузок [29, с. 208]. С достаточной точностью обкатку можно считать законченной, если у двигателя стабилизировалась мощность механических потерь [48, с. 125; 85, с. 42].

Известно, что мощность механических потерь, определяемая по моменту прокручивания, часто используется для контроля приработки при холодной обкатке на электротормозных стендах вследствие простоты и возможности непрерывного его измерения.

Метод индцирования двигателя требует значительных затрат труда и времени на подготовку опыта. Кроме того, он допускает большие погрешности в определении площади индикаторной диаграммы планиметрированием, что вносит искажение в дальнейшие расчеты.

Для сравнительной оценки механические потери определялись методом выключения цилиндров, индцированием двигателей и прокручиванием коленчатого вала от постороннего источника энергии, дающими сходные результаты [86, с. 78]. Поэтому лучше пользоваться самым простым методом – прокручиванием двигателя электробалансирным динамометром [81, 87, 88].

В процессе изучения трения в двигателях на Горьковском автозаводе были разработаны и внедрены методы оценки приработки деталей и сопряжений по стабилизации показателей мощности механических потерь, что позволило за короткие сроки оптимизировать условия, режимы и продолжительность стендовой обкатки двигателей для

крупносерийного производства [33, с. 63]. Получена приемлемая сходимость результатов при определении продолжительности этапа приработки двигателей ЯМЗ-236, ЯМЗ-238, выявленная методами оценки износов и механических потерь [27, с. 57].

Торможение двигателей внутреннего сгорания производится для создания нагрузки на коленчатом валу при их горячей обкатке и снятии при этом основных эксплуатационных показателей. Взаимосвязь этих показателей наглядно представляется графически в виде регулировочных и эксплуатационных характеристик.

Часто обкаточные стенды необходимы в эксплуатирующих организациях, имеющих большой парк техники и проводящих средний и капитальный ремонты своими силами, а также выполняющих обкатку указанной техники.

Качественная обкатка при ремонте обеспечивает увеличение ресурса обкатываемых агрегатов более чем на 80 %. Очевидно, что приобретение этого вида оборудования для предприятий, производящих ремонт и обкатку различных агрегатов, является весьма актуальным вопросом.

Разнообразие выпускаемых в мире обкаточно-тормозных стендов позволяет выбрать оптимальную схему стенда и разработать его конструкцию для конкретных условий отечественного ремонтного производства двигателей внутреннего сгорания.

Для проведения холодной обкатки в качестве приводных устройств применяются электрические или тепловые двигатели, а для создания тормозного момента на стадии горячей обкатки под нагрузкой – гидравлические, пневматические, механические и электрические нагружающие устройства. [48, с. 129; 89, с. 53; 90, с. 313].

В гидравлических устройствах торможение двигателя выполняется за счет сопротивления потока жидкости. Они относительно просты по конструкции, компактны и обладают большой энергоемкостью (стенд фирмы Schenck позволяет нагружать двигатели мощностью до 1900 кВт с частотой вращения до 4000 оборотов в минуту [30]). Для стендовой обкатки на режимах прокрутки может дополнительно использоваться электродвигатель. Вследствие непригодности для холодной обкатки, неустойчивости работы на малых нагрузках, большого расхода воды и сложности использования энергии торможения, гидротормоза в настоящее время нашли ограниченное применение [48, с. 129; 89, с. 53].

Гидрообъемные динамометры обладают возможностью проводить и холодную и горячую обкатку, поэтому ведется разработка

обкаточно-тормозного стенда с максимальной тормозной мощностью 325 кВт, который позволит обкатывать большинство двигателей, используемых в сельском хозяйстве [56].

Пневматические тормоза представляют собой воздушные винты и мулнетки, они применяются для испытания авиационных двигателей.

Механические тормоза имеют малую энергоемкость, нестабильные характеристики, быстро изнашиваются. Поэтому в настоящее время они практически не используются.

При испытании автотракторных двигателей большое распространение получили стенды с гидравлическими и электрическими тормозными установками.

При использовании гидротормозного устройства максимальная мощность привода насоса, необходимая для торможения двигателя, определяется:

$$N_n = \frac{N_p}{\eta_n}, \quad (2.1)$$

где η_n – КПД насоса ($\eta_n = 0,89...0,91$ – для аксиально-плунжерных насосов с наклонным диском; $\eta_n = 0,92, 0,93$ – для аксиально-плунжерных насосов с наклонным блоком).

По особенностям конструкции гидравлические тормоза разделяют на дисковые, штифтовые и лопастные [91].

На установившемся режиме реактивный момент статора тормоза равен крутящему моменту испытываемого двигателя.

Установки, у которых крутящий момент на валу двигателя определяется по реактивному моменту, называются балансирными.

Тормозной момент зависит от реальной ширины кольцевого слоя воды, который образуется при вращении дисков ротора. С изменением радиальной ширины кольца воды изменяется и поверхность соприкосновения с водой дисков ротора и корпуса.

Ширина кольцевого слоя воды может регулироваться двумя путями:

а) изменением положения сливного отверстия в заслонке. При вращении заслонки маховичком окно ее перемещается от наиболее удаленной от оси тормоза точки к наиболее близкой. При этом необходимо поддерживать постоянную подачу воды в корпус;

б) изменением количества подаваемой воды при зафиксированном положении сливного отверстия в заслонке.

Крутящий момент обкатываемого двигателя проще контролировать по давлению, так как расход жидкости контролировать сложнее, и он зависит еще и от времени.

При торможении двигателя необходимо, чтобы рабочий объем насоса мог изменяться от 0 до максимального значения. Это позволит плавно изменять тормозной момент в необходимом диапазоне.

С целью продления ресурса насоса и гидроаппаратуры максимальное давление в напорной магистрали при максимальном рабочем объеме гидронасоса необходимо поддерживать близким к номинальному значению. Ввиду того, что продолжительность обкатки на последних ступенях нагружения составляет 10 и 5 минут, то допустимо некоторое кратковременное превышение номинального давления.

В качестве нагружающего устройства электрогидравлического обкаточно-тормозного стенда предлагается применение гидравлических насосов объемного типа, которые используются в объемном гидроприводе, получившем наиболее широкое распространение в машиностроении.

Наиболее подходящими для торможения двигателя являются регулируемые аксиально-плунжерные насосы. На рис. 2.4 приведена гидравлическая схема нагружающего устройства.

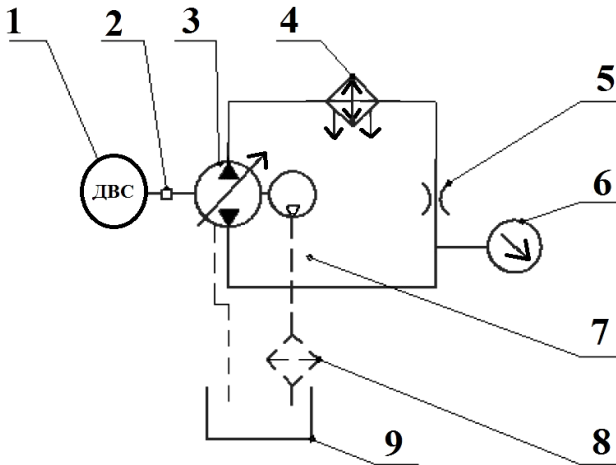


Рис. 2.4. Гидравлическая схема тормозного устройства:

1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – тахометр; 3 – регулируемый аксиально-плунжерный насос; 4 – теплообменный аппарат; 5 – дроссель постоянного сечения; 6 – манометр; 7 – насос подпитки; 8 – фильтр; 9 – гидробак

Тормозной момент на коленчатом валу двигателя внутреннего сгорания 1, а, следовательно, и на валу регулируемого аксиально-плунжерного насоса 3 создается нагнетанием жидкости через дроссель постоянного сечения 5, т. е. дросселированием, и контролируется по манометру 6. При дросселировании потока жидкости под высоким давлением механическая энергия торможения будет превращаться в тепловую, т. е. будет происходить нагрев рабочей жидкости. Для охлаждения жидкости в конструкции стенда предусмотрен рекуперативный теплообменный аппарат 4. Частота вращения коленчатого вала обкатываемого двигателя контролируется по тахометру 2.

Так как тормозной момент на валу насоса создается и изменяется дросселированием потока жидкости, то подача насоса будет ограничена ее расходом через отверстие дросселя. Преимущество использования в качестве тормоза регулируемых гидравлических насосов состоит в возможности дросселирования потока жидкости через дроссель постоянного сечения.

Так как привод аксиально-плунжерного насоса осуществляется обкатываемым двигателем, то крутящий момент двигателя равен моменту привода вала насоса. Значит, при помощи регулируемого аксиально-плунжерного насоса можно создавать и изменять нагрузку на валу ДВС, используя дроссель постоянного сечения, т. е. производить обкатку под нагрузкой для приработки трущихся поверхностей и снимать его эксплуатационные характеристики.

Применение аксиально-плунжерных насосов в качестве тормоза при обкатке и испытаниях ДВС является возможным на предприятиях с небольшим объемом обкатки двигателей. Развитие этого направления позволит в короткие сроки оснастить ремонтные предприятия дешевыми, малогабаритными и надежными стендами.

Гидравлические тормоза просты по устройству, удобны в эксплуатации, обладают высокой энергоемкостью и бесшумны в работе.

Однако следует отметить и недостатки, а именно - невозможность использовать энергию, вырабатываемую двигателем; для проворачивания коленчатого вала при запуске двигателя необходимо иметь посторонний источник энергии. На тормозной установке, оборудованной гидротормозом, невозможно производить холодную обкатку двигателя. Большая инерционность гидротормозов является серьезным препятствием для введения автоматического регулирования нагрузки.

В дальнем зарубежье используются передвижные тормозные стенды, например ZW 500, с вихретоковым тормозом, стоимость которого превышает 120 тысяч евро [152].

Обкаточно-тормозные стенды для испытаний и послеремонтной обкатки дизелей в настоящее время в России и странах СНГ практически не производятся. Особенно это касается дизелей с мощностями более 250 кВт.

Так, например, серия обкаточных стендов KC276 предназначена для дизелей автомобилей и тракторов мощностью не более 250 кВт, обеспечивает нагружение дизеля только в процессе его динамического разгона и торможения электродвигателем малой мощности (20...55 кВт – в зависимости от типа дизеля).

Двигатели чаще всего обкатываются на электро- и гидротормозных стендах, позволяющих плавно или ступенчато изменять частоту вращения коленчатого вала и нагрузку двигателя в широких пределах.

В электрическом нагрузочном устройстве создание тормозного момента осуществляется за счет электромагнитных сил взаимодействия между статором и ротором.

Электрические приводные и нагружающие устройства обкаточно-испытательных стендов подразделяются на индукционные муфты и тормоза, а также электроприводы постоянного и переменного тока.

Стенды с электроприводами постоянного тока удовлетворяют всем технологическим требованиям обкатки автотракторных двигателей [92, 30]. Однако из-за сложности, высокой стоимости и недостаточной надежности машин постоянного тока эти стенды применяются в основном в исследовательских лабораториях, конструкторских бюро и при ответственных испытаниях двигателей на крупных моторостроительных заводах.

Большинство электроприводов постоянного тока заменяется на электропривода переменного тока.

Стенды 1970...1980 гг. на основе электрических двигателей постоянного тока производства ГДР (SAK- 670) и Чехословакии (MS-637) выработали свой ресурс. Новые испытательные стенды (тормозного устройства на основе электродвигателя постоянного тока) чешской фирмы MTZSERVIS (VESELIN) имеют крайне высокую стоимость. Измерительное оборудование для стенда приобретается фирмой MTZSERVIS у фирмы AVL.

В последнее время потребность ремонтного производства в обкаточно-тормозных стендах даже возросла. Это связано со старением распространенных в стране стендов, разработанных ГОСНИТИ на базе асинхронных машин с фазным ротором.

Электротормозной стенд, основа которого – электродвигатель с фазным ротором, обеспечивает вращение коленчатого вала автотракторного двигателя в режиме электродвигателя и нагружение его в режиме генератора [93, с. 49].

Изменение крутящего момента электродвигателя стенда происходит при уменьшении электрического сопротивления в цепи фазного ротора. При заглоблении ножей реостата в электролит происходит уменьшение межфазного омического сопротивления обмотки ротора, приводящего к увеличению силы тока в обмотке ротора и его магнитной индукции [70, с. 96].

В некоторых моделях стенда взамен жидкостного реостата стенда используется тиристорное регулирование, позволяющее обеспечить управление двигателем в широком диапазоне частот вращения коленчатого вала, например, инверторы и регуляторы фирм «Хитачи» и «Индустриал системс» [94; 8 с. 55].

В настоящее время используются обкаточно-тормозные стенды на базе асинхронного электродвигателя (АЭД) переменного тока, управление которым осуществляется серийно выпускаемыми преобразователями частоты, имеющими интерфейс с компьютером. При этом в отличие от стендов с нагрузочным генератором, обеспечивается возможность запуска дизеля от АЭД стенда, а не от стартера и проведение холодной обкатки с использованием АЭД.

Как правило, современный стенд состоит из следующих основных частей:

- тормозного устройства, позволяющего регулировать тормозной момент на валу ДВС;
- компьютерной системой или пультом управления стендом, системой контроля и регистрацией параметров технического состояния ДВС;
- установочной рамы с узлами монтажа ДВС и тормозного устройства;
- системы питания дизеля воздухом и удаления отработавших газов;
- топливной системы питания дизеля;
- масляной системы питания дизеля;

- водяной системы охлаждения дизеля;
- систем регулирования температуры масла и охлаждающей жидкости.

Часто в целях экономии средств изготовление и монтаж установочной рамы и вспомогательных систем производится силами Заказчика.

Разработаны и поставляются современные типы обкаточно-тормозных стендов, которые обеспечивают испытание дизелей грузовых и легковых автомобилей, сельскохозяйственных машин, тепловозов, спецагрегатов. Основной отличительной особенностью стендов является использование в качестве привода при холодной обкатке и в качестве тормозного (нагрузочного) устройства при «горячей» обкатке под нагрузкой одного АЭД, управляемого преобразователем частоты.

Производятся обкаточно-тормозные стенды (рис. 2.5) для испытания дизелей мощностью 150...3000 кВт двух типов: без рекуперации электрической энергии (тип А) и с рекуперацией электрической энергии (тип Б). Стенды разных типов различаются наличием, а также схемой подключения.

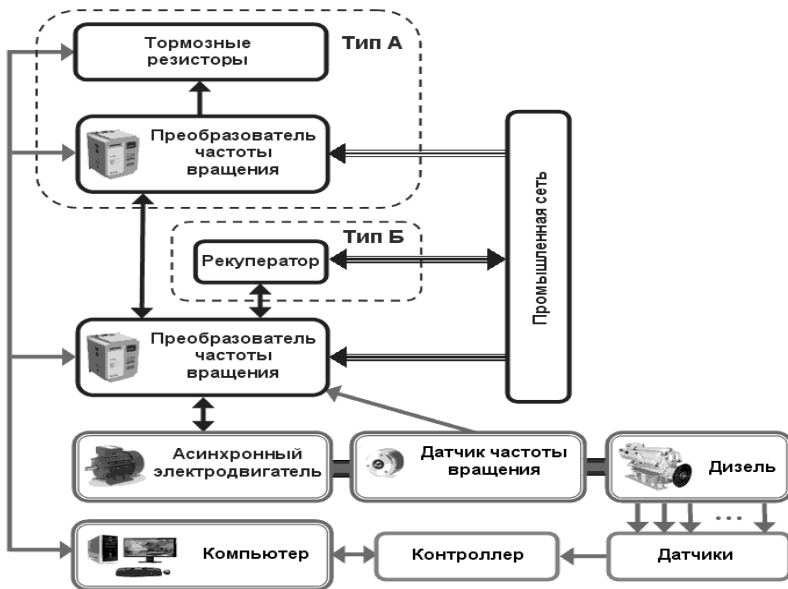


Рис. 2.5. Обкаточно-тормозной стенд ДВС. Схема управления

При динамическом торможении, когда АЭД работает при «горячей» обкатке в генераторном режиме, энергия вращения преобразуется в электрическую энергию, которая подается на тормозные резисторы, где рассеивается в виде тепла или передается через рекуператор в промышленную сеть. Стенды позволяют регистрировать нагрузочный момент (по току АЭД) с точностью 2...3 % и частоту вращения без использования дорогостоящих датчиков крутящего момента (точность до 0,1 %);

Система управления и регистрации стендов включает в себя:

- асинхронный электродвигатель (АЭД);
- частотный преобразователь для управления АЭД;
- частотный преобразователь, обеспечивающий регулируемое преобразование энергии торможения АЭД тормозными резисторами в тепло – для типа А или рекуператор для возврата электрической энергии торможения в электрическую сеть – для типа Б;
- комплект датчиков и устройства преобразования их сигналов;
- компьютер и специализированное программное обеспечение для управления режимами обкатки дизеля, регистрации параметров и протоколирования результатов испытаний.

К недостаткам стендов типа А следует отнести дополнительные расходы на электроэнергию, расходуемую при преобразовании в тепло, а также в связи с этим необходимость относительно большого помещения и дополнительных устройств для отвода тепла с тормозных резисторов.

Стенды типа Б обеспечивают возврат электрической энергии торможения в электрическую сеть с КПД не менее 90 %. Стенды без рекуперации дороже стендов с рекуперацией на 20...40 %. Поэтому данный тип стендов более востребован.

Управляющая система имеет существенное отличие от аналогичных систем, так как она обеспечивает управление режимами работы стенда при постоянных значениях момента или частоты вращения коленчатого вала в ручном и автоматическом режимах обкатки ДВС.

Измерение параметров технического состояния осуществляется с помощью датчиков, имеющих аналоговый или цифровой выходной сигнал. Сигналы с датчиков поступают в контроллер, подключаемый к персональному компьютеру.

Результаты измерений, технологические указания по режимам обкатки, нормативные значения контролируемых параметров в графическом и табличном виде отображаются на мониторе компьютера.

Программа контролирует измеряемые параметры и действия оператора – при выходе за допустимые диапазоны значений выдает соответствующие предупреждающие сигналы и команды на управляющую систему, вплоть до остановки стенда.

Для мощностей стендов 400...500 кВт может быть использована промышленная трехфазная сеть 220×380 В, для мощностей 600...2500 кВт требуется уже трехфазное напряжение 400×690 В, для мощностей 3000 кВт и более необходимо использовать асинхронные двигатели, напряжение питания которых 1000 В, 3000 В, 6000 В и даже 10000 В.

При мощности электропривода выше 400 кВт электродвигатели изготавливаются заводами-производителями только под заказ. Срок изготовления 3...5 месяца. Срок изготовления стенда 4...6 месяцев (в зависимости от модификации стенда). Гарантийные обязательства на стенд – 12 месяцев с момента сдачи стенда в эксплуатацию.

Значительно реже применяется без тормозная обкатка, при которой нагрузкой служат собственные сопротивления прокручиванию и обкатка с ограничением нагрузки постановкой шайбы во впускной патрубке карбюраторного двигателя или фиксированием положения рейки топливного насоса дизеля.

При без тормозной обкатке двигателей нагружение может выполняться за счет ступенчатого изменения подачи топлива, при котором обеспечиваются попеременные стадии разгонов и выбегов от минимальных до максимальных частот вращения коленчатого вала [40]. Для карбюраторных двигателей один из способов обкатки – это чередование «разгонов» и «выбегов» за счет изменения угла опережения зажигания и выключения зажигания при максимальной частоте вращения коленчатого вала двигателя.

Санкт-Петербургским аграрным университетом совместно с Пензенской сельскохозяйственной академией разработан способ обкатки двигателей с динамическим торможением на неустановившихся без тормозных режимах и подготовлен к серийному производству на Пензенском ОАО «Завод коммунальной энергетики» комплект оборудования для обкатки автотракторных двигателей с использованием способа горячей обкатки с динамическим нагружением [38].

Тормозные методы обкатки более предпочтительны, так как проще в реализации и позволяют обеспечить нагрузку двигателя в широком диапазоне. При этом энергия торможения может recuperироваться в электрическую (электротормозные стенды) или тепловую (гидротормозные стенды) энергию.

Одним из способов ускорения процесса обкатки является применение ультразвука.

При обкатке двигателей внутреннего сгорания очень важным показателем, влияющим на качество приработки, является состояние смазочного масла. Поскольку смазочное масло обладает изоляционными свойствами, то при трении деталей на поверхности масляной пленки происходит накопление зарядов и как только величина зарядов превысит электрическую прочность масляной пленки, произойдет ее пробой. Поскольку потенциалы электризации смазки велики и могут достигать нескольких десятков вольт, то при пробое происходит интенсивное повышение температуры и износ трущихся поверхностей. Для обеспечения лучшей проводимости масла необходимо измельчить имеющиеся в нем частицы до высокодисперсного состояния. Это возможно сделать при помощи ультразвуковых колебаний. При определенном времени ультразвуковой обработки достигается наименьший размер частиц присадки, что повышает проводимость масла и в целом улучшается его качество. Данный способ обработки масла ультразвуком позволяет снизить продолжительность обкатки, а, следовательно, уменьшить количество вредных выбросов в атмосферу, сократить время нахождения рабочего в неблагоприятных условиях труда.

Однако выброс вредных веществ в атмосферу также возможно уменьшить при помощи ультразвуковых колебаний, воздействуя ими на само топливо. Проведенными исследованиями установлено, что в обработанном ультразвуком топливе по сравнению с необработанным содержание фактических смол составляет 6,37 мг против 11,82 мг на 100 мл топлива, т. е. приблизительно 46 % разницы. Следовательно, обработка топлива ультразвуковыми колебаниями снижает интенсивность нагарообразования на деталях цилиндро-поршневой группы и выброс вредных веществ при его сжигании [142].

Кроме того, при низких температурах весьма затруднителен запуск двигателя внутреннего сгорания. Это нежелательное явление можно также устранить, воздействуя ультразвуком на топливо, подаваемое во впускной коллектор двигателя внутреннего сгорания. Там оно

предварительно подогревается, тем самым обеспечивая беспрепятственный запуск двигателя внутреннего сгорания в зимнее время [143].

На основании вышеизложенного нами предложено новое устройство для обкатки двигателя внутреннего сгорания [95], схема которого представлена на рис. 2.6.

Устройство содержит последовательно соединенные двигатель внутреннего сгорания 1, емкость отстоя 2, насос перекачки масла 3, блок центрифуг 4, бак со смазочным маслом 5.

Двигатель внутреннего сгорания 1 механически соединен с электродвигателем 6, причем статорные обмотки электродвигателя 6 соединены с сетью, а роторные обмотки соединены с нагрузочным устройством 7 и преобразователем 8. От преобразователя 8 запитывается ультразвуковой генератор 9, к которому подключен первый ультразвуковой излучатель 10, установленный в баке со смазочным маслом 5, и второй ультразвуковой излучатель 11, помещенный во впускной коллектор двигателя 1 для обработки топлива через регулятор изменения частоты и интенсивности ультразвуковых колебаний 12.

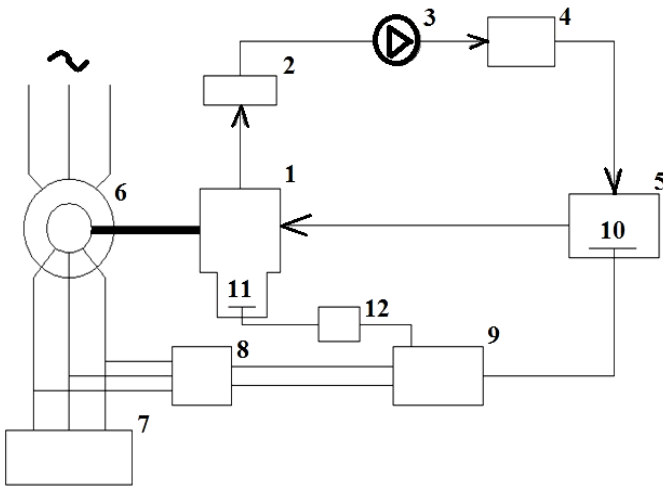


Рис. 2.6. Устройство для обкатки и испытания двигателя внутреннего сгорания:

- 1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – емкость отстоя; 3 – насос перекачки масла; 4 – блок центрифуг; 5 – бак со смазочным маслом; 6 – электродвигатель;
- 7 – нагрузочное устройство; 8 – преобразователь; 9 – ультразвуковой генератор;
- 10 – первый ультразвуковой излучатель; 11 – второй ультразвуковой излучатель;
- 12 – регулятор изменения частоты и интенсивности ультразвуковых колебаний

Напряжение с роторных обмоток электродвигателя 6 питает через преобразователь напряжения 8 ультразвуковой генератор 9. С ультразвукового генератора 9 импульсы подаются на первый излучатель 10 для улучшения свойств смазочного масла и второй излучатель 11, находящийся во впускном коллекторе двигателя внутреннего сгорания 1, для обработки топлива, поступающего в вышеупомянутый двигатель 1, механически соединенный с электродвигателем 6. При запуске двигателя внутреннего сгорания в зимний период второй ультразвуковой излучатель 11 обрабатывает топливо, поступающее в обкатываемый двигатель, повышая его испаряемость и облегчая его запуск, а после его запуска регулятор переходит в режим работы с параметрами ультразвуковых волн, обеспечивающих снижение нагарообразования на деталях цилиндропоршневой группы.

Данное устройство позволяет улучшить качество обкатки двигателя внутреннего сгорания после изготовления или ремонта за счет обработки топлива и масла ультразвуковыми колебаниями, используя для этого энергию скольжения работающего электродвигателя.

Другим способом сокращения продолжительности приработки деталей двигателей является обкатка с применением электрического тока.

Устройство для обкатки двигателя внутреннего сгорания с подачей электрического тока [64; 61] позволяет ускорить обкатку двигателя внутреннего сгорания после изготовления или ремонта за счет усиления окислительного процесса и эрозии металла. Недостатком существующего устройства является обкатка двигателей внутреннего сгорания по одинаковым режимам, без учета их технического состояния.

Поэтому была поставлена задача – сокращение продолжительности обкатки путем определения момента окончания приработки трущихся поверхностей деталей двигателей внутреннего сгорания в процессе обкатки за счет измерения величины электрического сопротивления поверхностей трения.

Обкатка с применением электрического тока сокращает продолжительность приработки деталей двигателей. Трущиеся детали, соединенные с положительным полюсом источника тока, подвергаются усиленному эрозийному воздействию. В процессе приработки зазор между трущимися поверхностями возрастает с увеличением толщины слоя смазки, при этом увеличивается сопротивление и уменьшается ток в цепи «коленчатый вал-блок». Стабилизация величины электри-

ческого сопротивления трущихся поверхностей может быть принята в качестве оценочного критерия об окончании приработки на данной ступени обкатки.

Таким образом, измерение и сравнение электрического сопротивления или тока цепи «коленчатый вал-блок» позволяет более точно определить окончание обкатки двигателей при каждом из режимов, а также позволяет автоматизировать процесс обкатки.

На рисунке 2.7 представлена схема разработанного устройства для обкатки и испытания двигателя внутреннего сгорания [80].

Устройство работает следующим образом. Источник тока *1* питает электрическую цепь: блок измерений *2* – трущиеся поверхности «коленчатый вал-блок» обкатываемого двигателя внутреннего сгорания *3*.

Электрический сигнал, пропорциональный величине сопротивления трущихся поверхностей, с выхода блока измерений *2* поступает на вход запоминающего устройства *5* и второй вход сравнивающего устройства *6*. В устройстве *6* сравниваются сигналы с блока измерений *2* и запоминающего устройства *5*, с которого попадает сигнал на первый вход сравнивающего устройства *6* с задержкой времени.

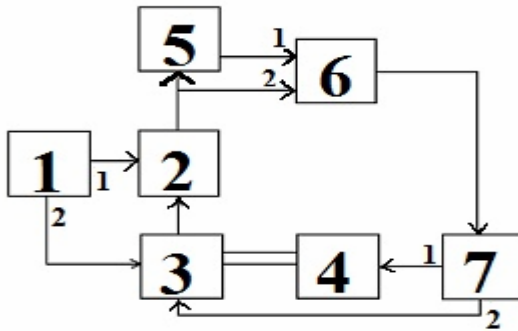


Рис. 2.7. Устройство для обкатки двигателя внутреннего сгорания:
1 – источник питания; *2* – блок измерений; *3* – обкатываемый двигатель;
4 – электродвигатель; *5* – запоминающее устройство; *6* – сравнивающее устройство; *7* – блок управления

С выхода сравнивающего устройства *6* на блок управления *7* поступает сигнал только в том случае, когда на первом и втором входах сравнивающего устройства *6* появятся сигналы равной величины, т. е.

сигнал с блока измерений 2 будет равен сигналу с задержкой времени с выхода запоминающего устройства 5, а это произойдет в случае стабилизации величины сопротивления трущихся поверхностей и окончания приработки на данном режиме.

Первый выход блока управления 7 регулирует скорость вращения и тормозную мощность электродвигателя 4, второй выход – режимы работы обкатываемого двигателя внутреннего сгорания 3.

Данное устройство позволяет сократить длительность обкатки путем определения момента окончания приработки трущихся поверхностей деталей двигателя внутреннего сгорания измерением величины электрического сопротивления поверхностей трения.

Одним из перспективных решений, позволяющих сократить продолжительность времени обкатки, уменьшить расход топлива и электроэнергии при обкатке является решение, предложенное авторами С. С. Куковым, А. В. Гриценко, В. А. Рожневым.

В предлагаемом способе обкатки двигателей внутреннего сгорания, заключающемся в холодной и горячей приработке, контроле, испытании и диагностике; холодную и горячую обкатку ведут адаптивно; в качестве диагностических параметров принимают температуру, крутящий момент, обороты коленчатого вала, причем параметры находятся в функциональной зависимости друг от друга, окончание приработки и начало диагностики достигается в момент стабилизации вышеуказанных параметров, в отличие от прототипа горячую обкатку проводят поэтапно: на первом этапе отключают из работы один цилиндр, затем второй; обеспечивают нагружение двигателя мощностью механических потерь двух выключенных из работы цилиндров; на втором этапе оставляют в работе только один цилиндр, причем при работе одного цилиндра двигатель нагружают мощностью механических потерь трех других; на третьем этапе нагружают один оставшийся в работе цилиндр, отключая рабочие импульсы электромагнитной форсунки (искры системы зажигания, впрыски форсунки дизельного двигателя), попутно обеспечивая полное открытие дроссельной заслонки; таким образом, обеспечивается максимальное нагружение одного работающего цилиндра; далее процедура повторяется с другими цилиндрами, при этом ведется сравнение механических потерь на каждом работающем цилиндре, обеспечивая пропорциональное нагружение; при больших механических потерях какого-либо из цилиндров акцент нагружения пере-

носят на данный цилиндр, обеспечивая обкатку до выравнивания механических потерь во всех цилиндрах; контроль и диагностику по указанным параметрам осуществляют с помощью компьютера.

Для осуществления данного способа обкатки предлагается стенд для обкатки и диагностики двигателей внутреннего сгорания, содержащий основание, нагрузочное и соединительное устройства, раму со стойками. Рама установлена с возможностью изменения ее длины под типоразмер двигателя, для чего основание рамы состоит из двух телескопических частей - рамы стенда и рамы нагрузочного механизма с совмещенными отверстиями и закрепленных между собой фиксаторами; на стойках, жестко прикрепленных к раме стенда, с помощью винтов закреплены продольные балки с возможностью перемещения их по вертикали, на которых установлены демпфирующие крепежные элементы для закрепления боковых частей двигателя на продольных балках, к которым жестко прикреплена поперечная балка с крепежными элементами для закрепления задней части двигателя.

Стенд для обкатки ДВС (рис. 2.8, 2.8.1) состоит из двух телескопических частей: рамы 1 нагрузочного механизма, рамы 2 стенда, на которые устанавливается двигатель 3. На раме 2 стенда расположены система питания 4, система выхлопа 5 и система охлаждения 6.

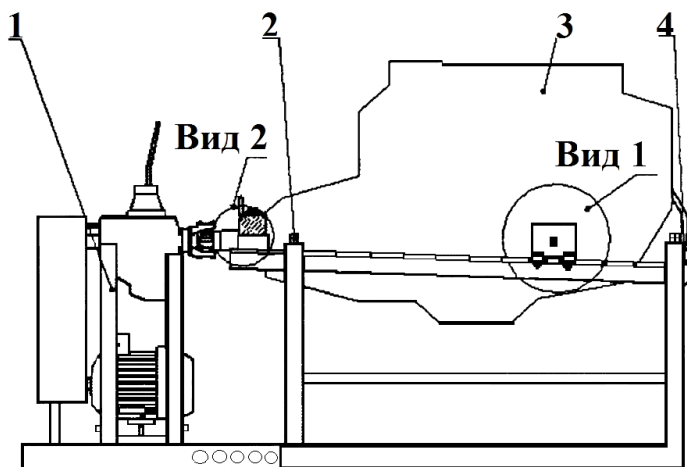


Рис. 2.8. Стенд для обкатки ДВС, вид сбоку

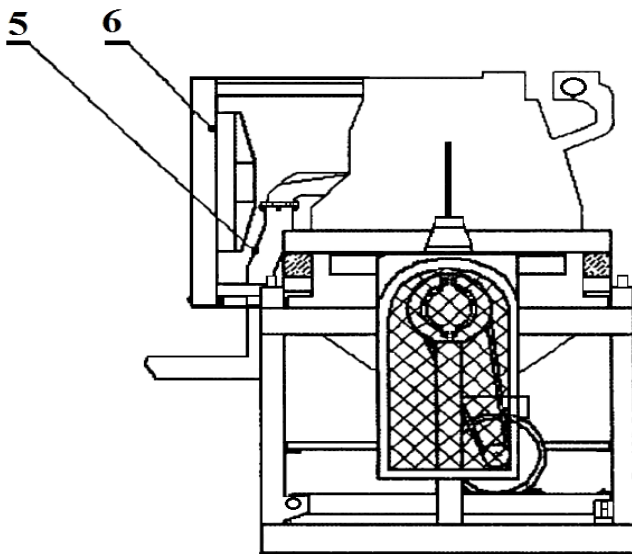


Рис. 2.8.1. Стенд для обкатки ДВС, вид спереди

Двигатель 4 устанавливается на демпфирующие крепежные элементы, как показано на рис. 2.9, а рама 1 нагрузочного механизма присоединяется к двигателю 4 через карданную передачу (рис. 2.10).

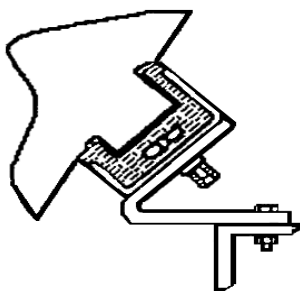


Рис. 2.9. Демпфирующий крепежный элемент

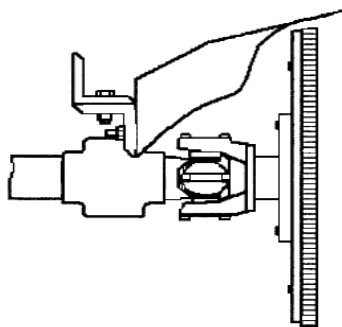


Рис. 2.10. Карданная передача

Рама 2 станда включает две параллельно расположенные продольные балки 7 крепления ДВС (рис. 2.11 и 2.12). Продольные балки 7 крепления ДВС через проушины 8 связаны со стойками 9, жестко прикрепленными к раме 2 станда. На стойках 9 установлены винты 10 для крепления продольных балок 7 с возможностью их перемещения по вертикали.

На продольных балках 7 установлены демпфирующие крепежные элементы 11 для закрепления боковых частей двигателя на продольных балках 7, а для закрепления задней части двигателя 4 к продольным балкам 7 используется поперечная балка 12 с крепежными элементами 13.

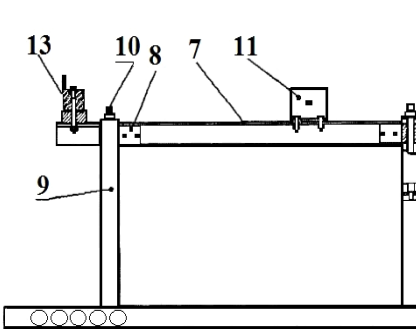


Рис. 2.11. Рама станда, вид сбоку

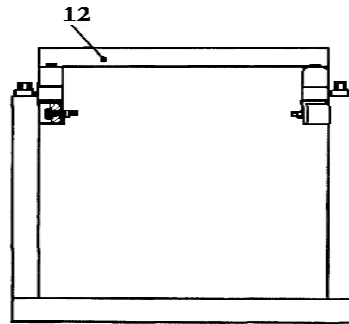


Рис. 2.12. Рама станда, вид спереди

Стенд работает следующим образом. Перед обкаткой двигателя 4 устанавливают продольные балки 7 под типоразмер обкатываемого двигателя 4. Для этого вращают винты 10 на заданную высоту установки двигателя 4, так, чтобы совместить карданную передачу и ось вращения коленчатого вала двигателя 4. При вращении винтов 10 они через проушины 8 перемещают продольные балки 7.

Сдвигают раму 2 станда относительно рамы 1 грузочного механизма под типоразмер обкатываемого двигателя 4. При этом совмещают отверстия внизу рамы 2 станда и рамы 1 грузочного механизма и закрепляют их в заданном положении фиксаторами.

С рамы 2 станда снимают демпфирующие крепежные элементы 11 и крепят к штатным креплениям двигателя 4. Также с рамы 2 станда снимают поперечную балку 12 и крепят к задней части двигателя 4. После

чего двигатель 4 ставят на раму 2 стенда и подсоединяют поперечную балку 12 к крепежным элементам 13. Также совмещают отверстия в демпфирующих крепежных элементах 11 и отверстия в продольных балках 7 крепления ДВС и фиксируют их болтовыми соединениями. Подсоединяют карданную передачу (рис. 2.11) к двигателю 4.

Далее к двигателю 4 подсоединяют систему охлаждения 6, систему выхлопа 5 и систему питания 3. Заливают в двигатель 4 масло, охлаждающую жидкость и топливо. Подсоединяют контрольные и диагностические системы. Проверяют надежность соединений и креплений.

Способ осуществляется следующим образом. Двигатель 4 устанавливают на стенд для обкатки ДВС.

Подсоединяют к двигателю систему топливоподачи 3, систему охлаждения 6, систему выпуска отработавших газов 5. Кроме того, подсоединяют контрольное и диагностическое оборудование. Для контроля процесса обкатки и диагностики используют персональный компьютер с многоканальной приставкой. Для отключения отдельных цилиндров используется отключатель электромагнитных форсунок.

Начинают холодную обкатку. В начале процесса холодной обкатки задают минимальную частоту вращения привода стенда, при которой обеспечивается надежная смазка элементов трения. Постепенно увеличивают частоту вращения коленчатого вала двигателя. Холодную обкатку ведут до установления нормативных значений основных рабочих параметров двигателя внутреннего сгорания.

Затем переходят к горячей обкатке, при этом запускают двигатель. Первоначально обеспечивают малую нагрузку или крутят двигатель без нагрузки. Далее начинают нагружать двигатель поэтапно. На первом этапе отключают из работы один цилиндр, затем второй. Обеспечивают нагружение двигателя мощностью механических потерь двух выключенных из работы цилиндров. На втором этапе оставляют в работе только один цилиндр, причем при работе одного цилиндра двигатель нагружают мощностью механических потерь трех других. На третьем этапе нагружают один оставшийся в работе цилиндр, отключая рабочие импульсы электромагнитной форсунки, обеспечивая полное открытие дроссельной заслонки. Таким образом, обеспечивается максимальное нагружение одного работающего цилиндра. Затем процедура повторяется с другими цилиндрами, при этом ведется сравнение механических потерь на каждом работающем цилиндре. Обеспечивается пропорциональное

нагружение, если же какой-то цилиндр дает большие потери, в этом случае акцент нагружения переносят на данный цилиндр, обеспечивая обкатку до выравнивания механических потерь во всех цилиндрах. Таким образом, осуществляется диагностирование в процессе обкатки, что позволяет вносить корректировки в режимы обкатки. Адаптивность обкатки заключается в переносе нагружения на те цилиндры, которые заметно отличаются от других по мощности механических потерь.

Однако стенду также присущи недостатки: значительные вибрации, передающиеся от двигателя на основание стенда и на фундамент помещения, в котором установлен стенд, невозможность обеспечения фиксированных значений оборотов во время обкатки ДВС, недостаточная надежность крепления двигателя на вертикальных стойках, а, следовательно, вибрации и колебания при обкатке, малая вариация нагрузочных режимов, отсутствие контрольных приборов, невозможность полноценной горячей обкатки.

Использование в стендах более совершенных приводных и нагружающих устройств открывает широкие возможности автоматизации процесса обкатки двигателей. Автоматизация обкатки повышает производительность труда, улучшает качество и снижает себестоимость ремонта, повышает долговечность двигателей. В разработанных ранее устройствах автоматизации преимущественно использовался принцип программирования процесса обкатки во времени и значительно реже – в зависимости от качества приработки трущихся поверхностей деталей [96, 89].

Автоматическое управление горячей холостой обкаткой во времени с помощью исполнительного механизма, связанного с рычагом дросселя карбюратора, применялось на Горьковском автомобильном и Мелитопольском моторном заводах. Подобные решения использовались в конструкциях Московского автомобильно-дорожного института и Центрального научно-исследовательского института механизации и энергетики лесной промышленности [85, с. 71]. Устройство работало с разомкнутой цепью воздействия (без обратных связей). Основные недостатки – ограниченность применения и нестабильность работы электрической схемы.

В устройстве ГОСНИТИ для бесступенчатой обкатки тракторных двигателей изменение скоростного и нагрузочного режимов осуществлялось постепенным опусканием электродов жидкостного

реостата электролита и натяжением пружин регулятора топливного насоса с помощью связанных с ними исполнительных механизмов. Схема управления обкаточным стендом разомкнута. Она не учитывала случайные изменения частоты вращения и нагрузки. Опытные образцы испытывались на Ярославском моторном и на Харьковском моторостроительном заводе «Серп и Молот». Вследствие низкой надежности и нестабильности работы устройство не получило распространения [70, с. 151].

Стенды с программным управлением обкаткой разрабатывались в разное время институтом «Гипротракторсельмаш», Минским моторным заводом, Белорусским институтом механизации сельского хозяйства – БГАТУ [89; 8, с. 73; 97], и другими организациями, а также в дальнем зарубежье [98, 99].

Программу обкатки двигателя можно задавать с помощью блока системы автоматизированного управления [53, с. 139]. Для ручного управления используют пульт управления. На информационное табло выведены: номер этапа обкатки, время обкатки, частота вращения коленчатого вала, мощность, температура воды и масла, давление масла. Многоточечный потенциометр регистрирует расход топлива, мощность, температуру воды и масла, давление масла, частоту вращения коленчатого вала.

Способ контроля приработки двигателя по замеру мощности механических потерь лежит в основе автоматического устройства Челябинского института механизации и электрификации сельского хозяйства и Ленинградского сельскохозяйственного института [43].

Устройство управления процессом обкатки включает в себя два блока автоматизации и фотоэлектрический датчик момента. Блок автоматизации через кабель соединен с фотоэлектрическим датчиком, датчиком тахометра, исполнительными механизмами. После пуска электрической машины стенда измеряют показания весового механизма и, увеличив этот момент на 50 Нж, считают его оптимальным критическим моментом. Свет попадает на определенные фотосопротивления в зависимости от положения маятникового механизма фотоэлектрического датчика, срабатывают соответствующие ключевые схемы, и полученные сигналы сравниваются с опорным сигналом. Для данного цикла обкатки автоматически увеличивается частота вращения до заданной, поддерживая постоянным критический момент.

Недостатком этих устройств является то, что по мощности механических потерь сравнительно просто автоматизирован только процесс холодной обкатки, в то время как наиболее энергоемкий процесс – горячая обкатка под нагрузкой – выполняется вручную. Так как эти устройства применялись в стендах с жидкостными регулировочными реостатами с разомкнутой цепью воздействия и с двухпозиционным регулятором, их работоспособность оказалась низкой.

Исследования по разработке адаптивных систем управления обкаткой проводятся в оренбургском сельскохозяйственном институте и государственном университете [37, с. 31; 69]. В результате этих работ получены алгоритмы и реализованы регуляторы управления обкаткой, например, из условия ограничения мощности тепловых потерь, давления сжатых газов в цилиндре или по стабилизации момента и оборотов на валу, температуры и давления в масляной магистрали.

Во всех промышленно развитых странах на моторостроительных, мотороремонтных предприятиях и в исследовательских центрах применяются автоматизированные комплексы для обкатки и испытания ДВС. На этих комплексах проводят программное управление обкаткой по различным параметрам, а также испытание двигателей на различных режимах, контроль и обработку параметров двигателей при обкатке с анализом и хранением результатов [30].

Обкаточно-испытательные стенды снабжены устройствами ручного и автоматического управления, при сложном алгоритме управления имеют двухуровневую систему управления с микропроцессором, управляющим работой двигателя и стенда. Кроме того, микропроцессор обеспечивает защиту стенда и двигателя от аварийных режимов работы, производит сбор, обработку результатов измерений, осуществляет протоколирование и выдает необходимые данные в управляющую машину второго уровня, которая, в свою очередь, обслуживает группу стендов, выполняя экономические и статистические задачи, диагностирование, построение графиков, а также обеспечивает резервирование микропроцессора первого уровня [100, 92, 101]. В России подобная система была внедрена на КамАЗе, ГСКБ «Трансдизель», в Республике Беларусь – на Минском моторном заводе.

Поскольку статические и динамические характеристики разных дизелей могут существенно отличаться, при переходе к испытаниям другого двигателя или другому виду испытаний требуется дополнительная настройка [102].

Применение современных микропроцессорных систем при обкатке ДВС позволяет автоматически настраивать систему для получения оптимальных показателей (время срабатывания команды, величина перерегулирования при изменении режима, скорость затухания колебаний) вне зависимости от изменения статических и динамических характеристик каждого конкретного двигателя [103, с. 71; 99].

Для повышения качества и облегчения условий труда при проведении обкатки необходимо вести работы по автоматизации процесса, обеспечивая индивидуальную обкатку каждого двигателя в зависимости от технического состояния [37, с. 27; 71, с. 10; 104; 105]. За критерий окончания обкатки следует принимать время достижения двигателем нормативных значений технических параметров [98].

Общая продолжительность процесса обкатки при индивидуализации обкатки сокращается на 25–30 % [106].

Применение современной элементной базы позволяет решить большую часть проблем управления процессом обкатки двигателя. Но, по-прежнему, остается нерешенным вопрос создания алгоритма управления, обеспечивающего установление режимов обкатки каждому двигателю [107].

ГЛАВА 3

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ РЕМОНТЕ АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

3.1. Определение мощности механических потерь автотракторных двигателей аналитическим методом

Мощность механических потерь складывается из потерь на трение в сопряжениях трущихся деталей дизеля; насосных потерь (потерь на сжатие воздуха и выталкивание отработавших газов); потерь на привод вспомогательных механизмов и агрегатов (механизма газораспределения, вентилятора, масляного, топливного и водяного насосов, генератора и компрессора).

Таким образом, мощность механических потерь $N_{мт}$ (кВт) определяется:

$$N_{мт} = N_{тр} + N_{нас} + N_{пр}, \quad (3.1)$$

где $N_{тр}$, $N_{нас}$, $N_{пр}$ – мощность механических потерь, соответственно, на трение, на насосные ходы и на привод вспомогательных механизмов и агрегатов, кВт.

Основная часть мощности механических потерь – потери на трение в механизмах дизеля (до 80 %). Большая часть потерь на трение приходится на пары «поршень – гильза», «поршневые кольца – гильза» (45–60 %), потери на трение в подшипниках составляют до 20 % [71; 23, с. 202].

Если допустить, что все вспомогательные агрегаты устанавливаются на двигатель уже приработанными, а насосные потери определяются конструкцией дизеля и в процессе обкатки не изменяются, то изменение мощности механических потерь в процессе обкатки в основном будет вызвано изменением потерь на трение [68].

Процесс обкатки дизеля связан с изменением мощности механических потерь, в том числе главными их составляющими – потерями на трение в сочлененных деталях и на привод

вспомогательных механизмов, которые в дальнейшем также отнесены к потерям на трение.

В работах [108, 75] рассматриваются балансы распределения механических потерь по отдельным узлам трения двигателей, приводятся результаты исследований влияния на мощность трения отдельных факторов и параметров, излагаются методы оценки величины мощности механических потерь и т. д. Важное значение при этом имеют не только экспериментальные, но и теоретические исследования, дающие гидродинамическую трактовку явлений, возникающих при трении деталей ЦПГ [51].

Оценка изменения мощности механических потерь для установившихся режимов по осредненным за цикл параметрам значительно упрощает расчеты, а в ряде случаев она единственно приемлема, несмотря на циклический характер большинства составляющих потерь на трение в дизеле [109].

Связь между мощностью механических потерь N_{mn} (кВт) и средним давлением механических потерь в дизеле $p_{тр.д}$ (Па) устанавливается уравнением [110, с. 21]:

$$N_{mn} = 10^{-3} p_{тр.д} \times \frac{n}{60} \times z \times k_t \times V_h, \quad (3.2)$$

где n – частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} ;

z – число цилиндров, шт.;

V_h – рабочий объем цилиндра, м^3 ;

k_t – коэффициент тактности, $k_t = 0,5$ для четырехтактных, и $k_t = 1$ для – двухтактных дизелей.

Среднее давление механических потерь дизеля, входящее в уравнение (2.2), может быть выражено через сумму основных составляющих:

$$p_{тр.д} = p_{тр.п} + p_{тр.к} + p_{тр.ш.п} + p_{тр.к.п} + p_{тр.з.п} + p_{тр.в.м} + p_{тр.0}, \quad (3.3)$$

где соответствующими индексами обозначены средние давления механических потерь: «п» – поршня о гильзу, «к» – колец о гильзу, «ш. п.» – в шатунных подшипниках, «к. п.» – в коренных подшипниках,

«з. п.» – в зубчатых передачах, «в. м.» – на привод вспомогательных механизмов и «0» – постоянные неучтенные потери.

В любой i -й трущейся паре среднее давление механических потерь $p_{\text{тp}i}$ (Па) за каждый ход подсчитывается по формуле:

$$p_{\text{тp}i} = \frac{f_{\text{тp}i} \times P_{Ni} \times S_i}{V_h}, \quad (3.4)$$

где $f_{\text{тp}i}$ – коэффициент трения скольжения (безразмерный);

P_{Ni} – осредненная за ход сила, нормальная по отношению к направлению движения трущихся поверхностей, Н;

S_i – путь, пройденный деталью за один ход поршня, м.

Основные трудности при описании составляющих средних значений механических потерь состоят в аналитическом представлении $f_{\text{тp}i}$ и P_{Ni} .

3.1.1. Среднее давление механических потерь поршня о гильзу

Нормальное удельное усилие p_N (Па), отнесенное к единице площади поршня, прижимающее поршень к гильзе, может быть приближенно определено:

$$p_N \approx p_{\text{дв}} \lambda_n \sin \alpha \approx (p_{\text{ц}} + p_j) \lambda_n \sin \alpha, \quad (3.5)$$

где $p_{\text{дв}}$ – удельное движущее усилие, Па;

$p_{\text{ц}}$ – избыточное давления газа, Па;

p_j – давления сил инерции поступательно движущихся масс, Па;

λ_n – отношение радиуса кривошипа R_K к длине шатуна;

α – угловое перемещение кривошипа, рад.

Допустима замена переменных по ходу поршня величин избыточного давления газа $p_{\text{ц}}$ и давления сил инерции поступательно движущихся масс p_j условными осредненными значениями $p_{\text{ц ср}}$ и $p_{j ср}$, которые, действуя на поршень, производят ту же работу, что и переменные [111].

Среднее по ходу поршня избыточное давление газа за такты сжатия и расширения, отнесенное к периоду за один оборот вала, может быть подсчитано по приближенной формуле:

$$p_{ц.ср} = p_a \times \frac{e^{n_1} - e}{e^{n_1} - 1} \times (e_{г} - 1) + \frac{e_{г} - e}{e_{г} - 1} \times 0,5 \times p_i - p_{карт}, \quad (3.6)$$

где p_a – давление в начале сжатия, Па;

e и $e_{г}$ – действительная и геометрическая (для двухтактных дизелей) степени сжатия;

p_i и $p_{карт}$ – среднее индикаторное давление и давление в карте, Па;

n_1 – показатель политропы сжатия.

Среднеинтегральное давление за такты насосных ходов, вызванное силами инерции поступательно движущихся масс, оценивается по приближенной формуле:

$$P_{jcp} \gg 0,0055 \times m_{jn} \times R_K \times (1 + \frac{1}{n}) \times \omega^2, \quad (3.7)$$

где m_{jn} – приведенная масса поступательно движущихся деталей, отнесенная к площади поршня, кг/м².

В процессах сжатия и расширения давление от сил инерции на одной части хода поршня усиливает, а на другой ослабляет действие газа на ту же величину. За весь ход сжатия или расширения действие P_{jcp} учитываться не должно и $p_{дв.ср} = p_{ц.ср}$.

Для четырехтактного дизеля даже с высокой степенью повышения давления воздуха на входе в цилиндр наддувом, где средние давления впуска и выпуска $p_{вып.ср}$ меньше, чем P_{jcp} , в период насосных ходов $p_{вып.ср}$ аналогично не должно учитываться действие газовых сил и $p_{дв.ср} = p_{jср}$.

Приняв коэффициент трения поршня о цилиндр по Орлову П. И. [112, с. 52] с учетом поправки Гюмбеля Л. [112, с. 53], после преобразований получим формулу:

$$p_{mp.n} = 2 \times \frac{k_n \times h_{mp}}{k_t \times D_{\text{ц}}^2} + 1 \div \frac{\eta_{\text{м.ст}}^{0.5} \times S \times \dot{\omega}^{0.5}}{D_{\text{ц}}^2} \times p_{\text{ц.сп}} \times \kappa_t + (1 - \kappa_t) \times P_{\text{г.сп}}^{0.5} \times (\eta_{\text{м.ст}} \times n)^{0.5}, \quad (3.8)$$

где $k_n = 0,33$ – постоянный коэффициент;

$h_{\text{тр}}$, $D_{\text{ц}}$ и S – высота юбки, диаметр цилиндра и ход поршня, м;

$\eta_{\text{м.ст}}$ – динамическая вязкость масла для среднеинтегральной по высоте температуры зеркала гильзы цилиндра, Па·с.

3.1.2. Среднее давление механических потерь поршневых колец

Среднее за один оборот вала радиальное давление на стенки цилиндра для каждого из компрессионных колец с учетом разгружающего действия газа (внутри масляной пленки между кольцом и гильзой перепад давлений по высоте при ламинарном течении газа считается линейным) складывается из давления сил собственной упругости кольца и избыточного давления газа, осредненного как за цикл, так и по высоте расположения колец [113, с. 156]:

$$p_{R_{\text{к.к}}} = p_{\text{у.к}} + \frac{1}{2 \times z_{\text{к.к}}} \times [p_{\text{ц.сп}} \times \kappa_t + 0,5(1 - \kappa_t)(p_{\text{вп.сп}} + p_{\text{вып.сп}}) - (1 - \kappa_t) \times p_{\text{г.сп}}] = p_{\text{у.к}} + \frac{p_{\text{г.сп}}}{2 \times z_{\text{к.к}}}, \quad (3.9)$$

где $p_{R_{\text{к.к}}}$ – радиальное давление, Па;

$p_{\text{у.к}}$ – давление сил собственной упругости компрессионного кольца, Па;

$z_{\text{к.к}}$ – число компрессионных колец, шт.;

$p_{\text{вп.сп}}$ и $p_{\text{вып.сп}}$ – средние давления за ход впуска и выпуск, Па;

$p_{\text{г.сп}}$ – среднее избыточное давление газа, Па.

Для маслосъемных колец учитывается только давление упругости, так как их заколочные объемы разгружены от сил давления газа маслоотводящими каналами.

Формула среднего давления механических потерь поршневых колец, в основу которой положена зависимость коэффициента жидкостного трения по Х. Хоргену [113, с. 185], в конечном виде содержит еще ряд, полученных на основе экспериментов поправочных коэффициентов и соотношений [114], отличающихся для разных типов дизелей:

$$p_{\text{тр.к}} = \frac{5,54}{D_{\text{ц}} \times \kappa_t} \times (h_{\text{м.ст}} \times n \times S)^{0,333} \cdot$$

$$\left[z_{\text{к.к}} \times h_{\text{к.к}}^{0,667} \times \frac{\dot{e}}{\hat{e}} p_{\text{у.к}} + \frac{p_{\text{г.сп}}}{2 \times z_{\text{к.к}}} \times \frac{C_m}{C_{\text{м.кр}}} \frac{\dot{e}}{\hat{e}} \frac{C_1}{\varnothing} \times \frac{\partial p_{\text{г.сп}}}{\partial p_{\text{г.сп.кр}}} \frac{\dot{e}}{\hat{e}} \frac{\dot{u}}{\dot{u}}^{c_2} + z_{\text{к.м}} \times (h_{\text{к.м}} \times p_{\text{у.м}})^{0,667} \times \right.$$

$$\left. \frac{\partial t_{\text{ст}}}{\partial t_{\text{ст.кр}}} \frac{\dot{e}}{\hat{e}} \frac{C_3}{\varnothing} \right], \quad (3.10)$$

- где $h_{\text{к.к}}$ и $h_{\text{к.м}}$ – высота компрессионных и маслосъемных колец, м;
 C_m – средняя скорость поршня, м/с;
 $C_{\text{м.кр}}$ – критическое значение средней скорости поршня, м/с;
 $z_{\text{к.м}}$ – число маслосъемных колец, шт.;
 $p_{\text{у.м}}$ – давления сил собственной упругости маслосъемного кольца, Па;
 $t_{\text{ст}}$ – температура стенки цилиндра, °С;
 $t_{\text{ст.кр}}$ – критическое значение температуры стенки цилиндра, °С.

В формуле (3.10) учитывается возрастание эффекта аккумулярования давления (остаточного давления в заколочном пространстве [115; 113, с. 195]) с увеличением средней скорости поршня сверх критической $C_{\text{м.кр}} \gg 6 \div 7$ м/с ($c_1 = 0,8 \div 1,1$) и с увеличением среднего давления газа выше $p_{\text{г.сп.кр}} = (2,5 \div 3,5) \times 10^5$ Па ($c_2 = 1,5 \div 2$). Изменение области полусухого трения с ростом температуры стенки цилиндра сверх кри-

тического значения $t_{ct.kp} = 110 \div 130$ °С учитывается последним в формуле (3.10) поправочным коэффициентом ($c_3 = 0,4 \div 0,6$).

3.1.3. Среднее давление механических потерь в подшипниках коленчатого вала

На шатунные и коренные подшипники коленчатого вала в течение цикла действуют переменные по величине силы давления газа, переменные по величине и направлению силы инерции поступательно движущихся масс и переменные по направлению силы инерции вращающихся масс. Суммирование и осреднение перечисленных сил обычным путем, основанным на использовании развернутых по углу поворота коленчатого вала (п. к. в.) или круговых диаграмм, – громоздко и неприемлемо в принятом методе расчета.

Уравнения для осредненных нагрузок на подшипники получены при следующих основных допущениях:

- сначала производится осреднение нагрузок, потом – суммирование;
- движущее усилие передается на шатунные шейки по бесконечно длинному шатуну;
- пересчет среднего по ходу поршня давления газа на среднее по углу п. к. в. осуществляется с помощью поправочного коэффициента k_n , зависящего от показателя политропы n_1 и степени сжатия e_r

$$P_{ц.сра} = k_n \times p_a \times \frac{e^{n_1} - e}{e(n_1 - 1)(e_r - 1)} + \frac{e_r - e}{e_r - 1} - 1 \frac{\dot{u}}{\ddot{u}} + p_a + 0,5 \times p_i - p_{карт}, \quad (3.11)$$

где $k_n = 1 + (n_1 - 1)(e_r - 1)$ – поправочный коэффициент;

- определение равнодействующей от средних движущих усилий и центробежных сил инерции производится интегрированием первых двух членов разложения функции в биномиальный ряд Ньютона;
- суммирование всех осредненных нагрузок выполняется по правилу сложения векторов;
- нагрузка на коренной подшипник от движущих усилий соседних цилиндров равна сумме их половинных величин; число коренных ше-

ек в этом случае может быть принято равным числу цилиндров, а осредненная длина коренной шейки $l_{\kappa,n}$ подсчитывается по формуле:

$$l_{\kappa,n} = \frac{\sum_{i=1}^{z+1} l_{\kappa,ni}}{z}; \quad (3.12)$$

- V-образный дизель рассматривается как совокупность двух рядных, плоскости симметрии которых составляют между собой угол развала α

- коленчатый вал рассматривается как разрезная балка, при этом повышение нагрузок на коренные подшипники учитывается поправочным коэффициентом $k_{\kappa} = 0,4 \div 0,6$;

С учетом принятых допущений среднее по углу п. к. в. давление за цикл, действующее на шатунный или коренной подшипник, определяется по формуле, единой для различных типов двигателей:

$$P_{п.ср} = a_1 \times \kappa_t \times \left(a_2 \times a_5 \times p_{п.ср} \right)^2 + a_4 \times p_R^2 \times \dot{u}^{0,5} + a_3 \times p_R + (1 - \kappa_t) \times \left(a_5 \times p_{ср} \right)^2 + a_4 \times p_R^2 \times \dot{u}^{0,5} \cdot \frac{\dot{e}}{\dot{e}} + \frac{2}{\pi} \times \frac{a_5 \times a_4 \times p_{ср} \times p_R \times \dot{u}}{\left(a_5 \times p_{ср} \right)^2 + p_R^2 \times \dot{u}}, \quad (3.13)$$

где $a_1 - a_5$ – постоянные коэффициенты, зависящие от типа дизеля и подшипника (табл. 3.1);

$$p_{ср} = \frac{2}{\pi} \times m_j \times R_{\kappa} \times \omega^2 - \text{среднее по углу п. к. в. давление от сил инерции поступательно движущихся масс, Па;}$$

p_R – давление от центробежных сил инерции (для шатунного

подшипника $p_{Ru} = m_{Ru} \times R_{\kappa} \times \omega^2$, для коренного подшипника

$$p_{Rcp} = \frac{m_R \times R_{\kappa} \times \omega^2}{2} \times \sqrt{2 \times (1 + \cos \psi)}, \text{ Па;}$$

ψ – угол заклинивания кривошипов, рад;

m_{Ru} и m_R – приведенные массы, отнесенные к площади поршня, вращающихся частей шатуна и деталей кривошипа, кг/м^2 ;

ω – угловая скорость, с^{-1} .

Таблица 3.1

Значения постоянных коэффициентов $a_1 - a_5$

Тип дизеля	Подшипник	Коэффициенты				
		a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Рядный	Шатунный Коренной	$\frac{1}{\kappa_\kappa}$	1	0	1	1
V-об- разный	Шатунный Коренной	$\frac{1}{\kappa_\kappa}$	1	0	1	$\sqrt{2 \times (1 + \cos \gamma)}$

Принимая коэффициент трения по Г. Фогельполю с учетом числа А. Зоммерфельда [115], получаем обобщенную зависимость среднего давления трения в любом i_n -м (шатунном или коренном) подшипнике скольжения:

$$p_{mp.in} = \frac{1,81}{\kappa_t} \times \frac{d_n}{R_\kappa} \times \frac{(l_n \times d_n)^{0,5}}{D_y} \times (\eta_{m.n} \times n \times p_{n.cpa})^{0,5}, \quad (3.14)$$

где d_n и l_n – диаметр и длина подшипника, м;

R_κ – радиуса кривошипа, м;

$\eta_{m.n}$ – динамическая вязкость масла при температуре в рабочей зоне подшипника, Па·с/мин.

Среднее давление механических потерь в подшипниках качения определяется по выражению:

$$p_{тр.к.п} = \frac{\pi}{2 \times \kappa_t} \times f_{тр.к} \times \frac{d_{cp}}{R_\kappa} \times p_{n.cpa}, \quad (3.15)$$

где d_{cp} – средний диаметр подшипника;

$f_{тр.к} = 0,001 \div 0,003$ – коэффициент сопротивления качению [67, с. 253; 112, с. 112].

Зависимость динамической вязкости η_m от температуры масла находится по эмпирической формуле:

$$\eta_m = \frac{62 \times \eta_{m50}}{(0,1 \times T_m)^{2,6}}, \quad (3.16)$$

где η_{m50} – динамическая вязкость масла при 50 °С, Па · мин;

T_m – температура масла, °С.

Температура масла в рабочей зоне подшипников зависит от температуры в системе $T_{m.вх}$ и величины подогрева масла ΔT_m за счет тепла, выделяющегося от трения. Величина ΔT_m считается по формуле:

$$\Delta T_m = \kappa_t \times \frac{(n \times p_{n.сра})^{0,5}}{T_{m.вх}^{1,5}}, \quad (3.17)$$

где κ_t – коэффициент, определяемый опытным путем на одном из известных режимов или приближенно:

$$\kappa_t = (6,5 \div 8) \times 10^2 d_n^2 l_n. \quad (3.18)$$

Для оценки величины $\eta_{m,ср}$, входящей в формулы (3.8) и (3.10), среднеинтегральная температура гильзы определяется по полуэмпирическим зависимостям [111].

3.1.4 Среднее давление механических потерь навесных вспомогательных механизмов и зубчатых передач

На основании обобщения опытных данных и теоретических исследований различных авторов получены полуэмпирические формулы для расчета величины условного среднего давления, эквивалентного затратам работы на привод вспомогательных механизмов и условно обозначаемого $p_{тр.в.м}$.

Величина $p_{тр.н}$ масляных, водяных, топливоподкачивающих и топливных насосов высокого давления (ТНВД) вычисляется по известной зависимости:

$$p_{mp.n} = \frac{Q_n \times Dp_n}{V_h \times n' \times \kappa_t \times \eta_n}, \quad (3.19)$$

где Q_n – производительность, м³/мин;

n' – частота вращения насоса, мин⁻¹;

Dp_n – перепад давления в насосе (для ТНВД вместо Dp_n принимается максимальное давление распыливания p_p^{\max}), Па;

η_n – коэффициент полезного действия (КПД) насоса.

Учитывая сложность происходящих процессов в зубчатых передачах и допуская на основании опубликованных данных [116, с. 30] независимость коэффициента трения от нагрузки и частоты вращения, принимаем

$$p_{тр.з.п} = A_{з.п} \times p_e, \quad (3.20)$$

где p_e – среднее эффективное давление, Па;

$A_{з.п}$ – коэффициент пропорциональности, определяемый на исходном режиме.

По полученным зависимостям оценены средние давления механических потерь и мощность механических потерь для дизелей ЯМЗ-236М и ЯМЗ-238М.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что для любого двигателя мощность механических потерь в процессе обкатки, прежде всего, зависит от конструктивно-технологических, внутренних и внешних параметров. Но определение для каждого конкретного дизеля мощности механических потерь в процессе обкатки только аналитическим путем довольно сложно и в производственных условиях является трудноосуществимым, так как требуется знание большого количества исходных данных, определить которые позволяют измерения, нарушающие процесс приработки. Следовательно, для разработки алгоритма управления режимами обкатки дизеля после ремонта необходимо провести экспериментальные исследования с целью определения влияния факторов на процесс изменения мощности механических потерь в процессе обкатки.

При этом необходимо решить задачу рационального планирования трудо- и ресурсоемкого экспериментального исследования.

Для оценки времени приработки двигателя важно получить не столько высокую точность в определении абсолютной величины механических потерь, сколько правильно отразить характер изменения и определить момент наступления относительной стабилизации этих потерь в зависимости от продолжительности приработки [32, с. 28].

3.2. Исследование влияния различных факторов на мощность механических потерь в процессе обкатки при ремонте

3.2.1. Общие сведения и теоретические предпосылки

Исследованию изменения механических потерь в процессе обкатки автотракторных дизелей в настоящее время хотя и посвящен ряд работ [84; 85, с. 44; 88], однако большинство из них устанавливают зависимость этих потерь без учета влияния величины начальной мощности механических потерь, а, если и рассматривают, то только в период холодной обкатки [68]. Поэтому представляет интерес проведение математического планирования и многофакторного эксперимента с увеличением числа факторов и изучением их влияния на мощность механических потерь дизелей в конце послеремонтной стендовой обкатки.

Последовательное варьирование одной переменной при фиксированных значениях всех остальных, с целью отыскания значения функции нескольких переменных, для которой отсутствует аналитическое выражение, требует выполнения большого количества опытов. В этом случае целесообразно использование методов математической теории планирования экспериментов, которые заключаются в выборе числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных, чтобы решить поставленную задачу с минимальными затратами и требуемой точностью. В терминах теории планирования экспериментов это можно сформулировать следующим образом: при не полном знании о так называемой функции отклика

$$y = f(x_1, x_2, \mathbf{K}, x_k),$$

где x_i – факторы – независимые переменные, которые можно варьировать при постановке опытов и управлять экспериментом с тем, чтобы получить математическую модель и в итоге найти значение функции отклика [117, с. 20; 118].

В общем случае функцию отклика, аналитическое выражение которой неизвестно, можно представить уравнением регрессии:

$$y = \beta_0 + \overset{\circ}{\underset{i}{a}} \beta_i x_i + \overset{\circ}{\underset{ij}{a}} \beta_{ij} x_i x_j + \overset{\circ}{\underset{i}{a}} \beta_{ii} x_i^2,$$

$$i = 1, 2, \mathbf{K}, k; \quad j \neq i,$$

а в первом приближении – уравнением линейной регрессии:

$$y = \beta_0 + \overset{\circ}{\underset{i}{a}} \beta_i x_i$$

или неполным квадратическим уравнением:

$$y = \beta_0 + \overset{\circ}{\underset{i}{a}} \beta_i x_i + \overset{\circ}{\underset{ij}{a}} \beta_{ij} x_i x_j.$$

Используя априорную информацию о результатах исследований параметров конструкции и режимов обкатки дизелей, выбираем диапазоны варьирования факторов (табл. 3.2). Для устранения недостатков классического регрессионного анализа, основными из которых являются корреляция между коэффициентами регрессии и трудности в оценке расчетных значений функции отклика, используем кодированные значения факторов

$$x_i = \frac{2z_i - z_{i1} - z_{i2}}{z_{i2} - z_{i1}},$$

где z_i – натуральное значение i -го фактора;

z_{i1} и z_{i2} – соответственно нижняя и верхняя границы изменения величины z_i (уровни ее стабилизации при проведении опытов).

Значениям z_{i1} и z_{i2} соответствуют кодированные значения $x_{i1} = -1$ и $x_{i2} = +1$.

Из анализа литературных источников и по результатам однофакторных экспериментов выделены для исследования следующие факторы [68, 108, 84]:

- частота вращения коленчатого вала – n , мин⁻¹;
- температура масла двигателя – T_m , °С;
- средняя скорость изменения мощности механических потерь – \bar{v} , Вт/мин;

- мощности механических потерь в начале обкатки – N_{m0} , кВт.

С целью уменьшения объемов исследований, упрощения алгоритма и устройства управления контроль мощности механических потерь осуществляем на одной фиксированной частоте вращения коленчатого вала, поэтому фактор n (частоту вращения коленчатого вала), исключаем из рассмотрения.

Средняя скорость изменения мощности механических потерь предназначена для характеристики выбранного режима обкатки, она определяется как среднее значение по результатам обкатки партии двигателей и является независимым и варьируемым фактором для конкретного двигателя с его начальной мощностью и мощностью механических потерь в конце обкатки.

Численные значения и диапазон варьирования факторов определены в соответствии с руководством по капитальному ремонту, технологическими характеристиками дизелей ЯМЗ-236М, ЯМЗ-238М после ремонта и производственным опытом ремонтного предприятия [119; 120, с. 198; 121].

В связи с установившейся практикой действующей нормативно-технической документации по обкатке [110, с. 10; 120, с. 200; 64, с. 6], удобством использования в производственных условиях, применили внесистемную единицу измерения времени – минуту и, соответственно, скорость изменения мощности механических потерь – ватт в минуту, а частоту вращения – мин^{-1} .

Для построения и анализа регрессионной модели были использованы результаты опытов, выполненных по плану полного трехфакторного эксперимента и композиционному плану [117, с. 52; 118]. Значение уровней и интервалов варьирования для двигателей ЯМЗ-236М приведены в табл. 3.2, план эксперимента – в табл. 3.3.

Таблица 3.2

Кодирование варьируемых параметров

Наименование показателей	Факторы		
	x_1	x_2	x_3
Варьируемые параметры	N_{m0}	\bar{v}	T_m
Единица измерения	кВт	Вт/мин	°С
Основной уровень ($X=0$)	9,06	22,5	75
Единица варьирования	0,65	4,5	20
Нижний уровень ($X=-1$)	8,41	18	55
Верхний уровень ($X=+1$)	9,72	27	95

Полагая в первом приближении приемлемым уравнение линейной регрессии (3.22) для получения информации, необходимой и достаточной, чтобы определить оценки b_j коэффициентов регрессии b_j , составляем план полного факторного эксперимента (ПФЭ) так, чтобы варианты опытов включали все возможные сочетания факторов на нижнем и верхнем уровнях. При $k = 3$ необходимо провести $N = 2^k = 8$ опытов. Результаты опытов по плану полного факторного эксперимента приведены в табл. 3.4, а дополнительных опытов по композиционному плану – в табл. 3.5.

Таблица 3.3

План полного трехфакторного эксперимента первого порядка

Номер опыта	Факторы		
	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Таблица 3.4

Результаты опытов по плану полного факторного эксперимента

Номер опыта	Факторы			N_{mk} , кВт		
	N_{m0}	\bar{v}	T_m	y_1	y_2	y_3
	x_1	x_2	x_3			
1	8,41	18	55	6,97	7,30	6,91
2	9,72	18	55	8,23	7,71	8,09
3	8,41	27	55	7,33	7,73	7,38
4	9,72	27	55	8,34	8,74	8,39
5	8,41	18	95	6,36	6,73	6,38
6	9,72	18	95	7,60	7,13	7,26
7	8,41	27	95	6,77	6,83	7,13
8	9,72	27	95	7,75	7,61	8,04

Таблица 3.5

Результаты дополнительных опытов по композиционному плану

Номер опыта	Факторы			N_{mk} , кВт		
	N_{m0}	\bar{v}	T_m	y_1	y_2	y_3
	x_1	x_2	x_3			
1	9,06	22,5	75	6,94	7,13	7,50
2	8,27	22,5	75	6,85	6,73	6,70
3	9,86	22,5	75	8,21	7,74	7,87
4	9,06	17,03	75	7,04	6,92	6,89
5	9,06	27,97	75	7,25	7,65	7,30
6	9,06	22,5	50,7	8,28	7,82	7,36
7	9,06	22,5	99,3	7,06	7,39	7,00

3.2.2. Построение и анализ уравнения регрессии при линейном планировании

После проведения опытов выполняем статистическую обработку экспериментальных данных, результаты расчетов, полученных с помощью пакета прикладных программ MATHCAD.

Среднее значение результатов i -го опыта (\bar{y}_i) определяем по формуле:

$$\bar{y}_i = n^{-1} \sum_{s=1}^n y_{is} . \quad (3.26)$$

В табл. 3.6 приведены средние значения мощности механических потерь в конце обкатки.

Таблица 3.6

Среднее значение результатов опытов

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
\bar{y}_i	7,06	8,01	7,48	8,49	6,49	7,33	6,91	7,8

Определяем ошибки повторных опытов по среднеквадратическому отклонению (S_u^2):

$$S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_u - \bar{y}_0)^2}{n - 1}. \quad (3.27)$$

Значения, полученные в результате расчета, сводим в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Среднеквадратические отклонения результатов

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
S_u^2	$4,41 \cdot 10^{-2}$	$7,24 \cdot 10^{-2}$	$4,75 \cdot 10^{-2}$	$4,75 \cdot 10^{-2}$	$4,33 \cdot 10^{-2}$	$5,89 \cdot 10^{-2}$	$3,72 \cdot 10^{-2}$	$4,81 \cdot 10^{-2}$

Дисперсию воспроизводимости рассчитываем по формуле:

$$s^2\{y_u\} = \frac{\sum_{u=1}^N S_u^2}{N} = \frac{0,4}{8} = 0,05. \quad (3.28)$$

Гипотеза об однородности дисперсий $s^2\{y_u\}$ при одинаковом числе повторностей во всех вариантах опыта проверяется с использованием критерия Кохрена [117, с. 55]:

$$G = \frac{s^2\{y_u\}_{\max}}{\sum_{u=1}^N s^2\{y_u\}} < G_{\alpha; n_n; N},$$

где $G_{\alpha; n_n; N}$ – табличное значение критерия при уровне значимости α , числах степеней свободы n_n и N ;
 N – число опытов.

При $n_n = n - 1 = 3 - 1 = 2$, $N=8$, уровне значимости 0,05
 $G_{\alpha; n_n; N} = 0,52$.

$$G = \frac{7,24 \cdot 10^{-2}}{0,4} = 0,18 < G_{\alpha; n_n; N} = 0,52.$$

Условие критерия выполняется, следовательно, дисперсии однородны.

Вычислим коэффициенты регрессии.

Уравнение математической модели с учетом парных взаимодействий имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3. \quad (3.30)$$

Оценки b_j коэффициентов функции отклика, представленной уравнениями регрессии, определяем по результатам опытов, используя математический аппарат регрессионного анализа и решая относительно неизвестных $b_0, b_1, \mathbf{K}, b_k$ систему нормальных уравнений, которая в матричной форме имеет вид:

$$x^T x b = x^T y,$$

откуда

$$b = c x^T y,$$

где x и x^T – матрица независимых переменных и соответствующая ей транспонированная матрица;

b и y – столбцевые матрицы соответственно коэффициентов регрессии b_j и результатов опытов y_u ;

$c = (x^T x)^{-1}$ – информационная (ковариационная) матрица.

Если план ортогональный, т. е. для любых двух столбцов матрицы x выполняется условие:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} = 0,$$

то матрица системы нормальных уравнений $x^T x$ является диагональной, что приводит к выражению:

$$b_j = \sum_{u=1}^N x_{ju} y_u / \sum_{u=1}^N x_{ju}^2,$$

где j – порядковый номер столбцов расширенной матрицы планирования;

$y_{i0} = n^{-1} \overset{\circ}{\mathbf{a}} \underset{s=1}{\overset{n}{y_{is}}}$ – среднее арифметическое результатов i -го опыта;

n – число повторностей в каждом из вариантов опыта;

$N = 2^k$ – число вариантов опыта.

При этом оценка свободного члена уравнения регрессии (3.22)

$$b_0 = b_{j0} - \bar{x}_i^2 \overset{\circ}{\mathbf{a}} \underset{i=1}{\overset{k}{b_{ii}}},$$

где b_{j0} – результат вычисления по формуле (3.32) при $j = 0$;

$$\bar{x}_i^2 = N^{-1} \overset{\circ}{\mathbf{a}} \underset{u=1}{\overset{N}{x_{iu}^2}}. \quad (3.33)$$

Коэффициенты регрессии, рассчитанные по вышеприведенным выражениям, равны:

$$\begin{array}{ll} b_0 = 7,45 & b_{12} = 1,37 \cdot 10^{-2} \\ b_1 = 0,46 & b_{13} = -2,87 \cdot 10^{-2} \\ b_2 = 0,22 & b_{23} = -1,25 \cdot 10^{-3} \\ b_3 = -0,31 & b_{123} = 8,77 \cdot 10^{-2} \end{array}$$

С учетом дисперсии воспроизводимости $s^2 \{y_u\} = 0,05$ находим значение

$$s^2 \{b_j\} = \frac{S_{\{y\}}^2}{N \mathcal{M}} = 2,08 \times 10^{-3}. \quad (3.34)$$

Границы доверительных интервалов для коэффициентов регрессии с доверительной вероятностью $\alpha = 0,95$ находим по формуле:

$$|b_j| > \mathbf{D}b_j = s \{b_j\} \mathcal{M}_{\gamma; n_g}.$$

где $t_{\gamma; n_g}$ – критическое значение t -распределения;

n_g – степень свободы, $n_g = N(n - 1) = 8(3 - 1) = 16$.

Критическое значение $t_{\gamma; n_g}$ находим по [122]. $t_{\gamma; n_g} = 2,12$.

$$Db_j = 4,56 \times 10^{-2} \times 2,12 = 9,66 \times 10^{-2}.$$

Сравнивая значения коэффициентов регрессии с границами доверительных интервалов, видим, что коэффициенты b_{12} , b_{13} , b_{23} и b_{123} незначимы. Уравнение регрессии примет вид:

$$y = 7,45 + 0,46x_1 + 0,22x_2 - 0,31x_3. \quad (3.36)$$

Проверяем адекватность полученного уравнения. Для этого вычисляем теоретические значения параметра y_p (табл. 3.8).

Таблица 3.8

Расчетные значения мощности механических потерь

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
y_p	7,07	8,0	7,52	8,44	6,45	7,37	6,89	7,82

Рассчитываем дисперсию адекватности:

$$s_{a0}^2 = \frac{n}{N - n_1} \times \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - y_p)^2, \quad (3.37)$$

где $n_1 = 5$ – число коэффициентов уравнения регрессии.

Рассчитываем остаточные дисперсии для уравнения нулевого порядка:

$$s_{R_0}^2 = \frac{n}{N - 1} \times \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - y_p)^2. \quad (3.38)$$

Адекватность модели определяем по критерию Фишера:

$$F = \frac{s_{R_0}^2}{s_{a0}^2}. \quad (3.39)$$

Подставив соответствующие значения, получим:

$$F = \frac{1,24}{8,15 \cdot 10^{-3}} = 152,15 > F_{\alpha, n_{a0}, n_e} = 8,89.$$

Следовательно, составленная модель неадекватно отражает данные эксперимента.

Проверим приемлемость линейного уравнения.

Свободный член линейного уравнения регрессии является совместной оценкой:

$$b_0 \hat{=} \beta_0 + \hat{a} \beta_{ii},$$

т. е. характеризует, кроме β_0 , сумму коэффициентов при квадратичных членах, которые в случае линейной регрессии полагаются незначимыми. Обоснованность линейного приближения проверяем постановкой опытов в центре плана, среднее арифметическое \bar{y}_0 которых является оценкой коэффициента β_0 , не смешанной с какими-либо взаимодействиями.

Линейное уравнение приемлемо, если разность $|\bar{y}_0 - b_0|$ статистически незначима, т. е. выполняется неравенство:

$$|\bar{y}_0 - b_0| < s \times \sqrt{\frac{N + n_0}{n_0 N}} t_{\gamma, n}, \quad (3.40)$$

где $s^2 = n^{-1} \left((N - 1) s^2 \{b_j\} + (n_0 - 1) s^2 \{\bar{y}_0\} \right)$ – средневзвешенное двух дисперсий с числом степеней свободы $n = N + n_0 - 2$;

$s^2 \{b_j\} = (nN)^{-1} s^2 \{y\}$ – дисперсия коэффициентов регрессии;

$s^2 \{\bar{y}_0\} = n_0^{-1} s^2 \{y_0\}$ – дисперсия среднего значения \bar{y}_0 ;

$t_{\gamma, n}$ – критическое значение t -распределения при двустороннем ограничении, доверительном уровне γ и числе степеней свободы n .

Проверяем приемлемость линейного уравнения, проведя опыты в центре плана.

$$\bar{y}_0 = (6,94, 7,13, 7,50).$$

$$\bar{y}_{0c} = 7,19.$$

$$|\bar{y}_0 - b_0| = 0,26.$$

$$n = N + n_0 - 2 = 8 + 3 - 2 = 9.$$

Критическое значение t -распределения при двустороннем ограничении, доверительном уровне $\gamma = 0,95$ и числе степеней свободы $n = 9$ находим по Приложению 2 [122, с. 469].

$$t_{\gamma;n} = 2,26.$$

Дисперсия коэффициентов регрессии:

$$s^2 \{b_j\} = 2,08 \cdot 10^{-3}.$$

$$s \{b_j\} = 4,56 \cdot 10^{-2}.$$

Дисперсия среднего значения:

$$s^2 \{y_0\} = 7,62 \cdot 10^{-3}.$$

$$s = 8,73 \cdot 10^{-2}.$$

$$s \times \sqrt{\frac{N+n_0}{n_0 N}} t_{g;n} = 8,73 \cdot 10^{-2} \times \sqrt{\frac{8+3}{3 \times 8}} \times 2,26 = 0,13.$$

Условие приемлемости линейного уравнения:

$$|y_0 - b_0| = 0,26 < s \times \sqrt{\frac{N+n_0}{n_0 N}} t_{g;n} = 0,13 \text{ – не выполняется.}$$

Если условие приемлемости линейного уравнения не выполняется, гипотезу о линейной модели функции надо отвергнуть и строить уравнение регрессии второго порядка.

Для построения уравнения регрессии второго порядка необходимо использовать результаты эксперимента в дополнительных опытах, поставленных в центре плана и в «звездных» точках.

3.2.3. Построение и анализ уравнения регрессии при композиционном планировании

Поскольку описание почти стационарной области на поверхности отклика вблизи экстремума обычно достигается использованием полинома второго порядка, необходимо составить и реализовать

такой план, в котором каждая переменная принимает хотя бы три разных значения. Следуя идее шагового эксперимента, целесообразно использовать композиционное планирование, дополнив уже реализованный план первого порядка определенным количеством экспериментальных точек, расположенных определенным образом, а именно: поставив эксперимент в центре плана и в $2k$ «звездных» точках – вершинах k -мерного аналога октаэдра, координаты которых при $k = 3$, $(\mathbf{ma}, 0, 0)$; $(0, \mathbf{ma}, 0)$; $(0, 0, \mathbf{ma})$.

Таким образом, при центральном композиционном планировании общее число опытов $N_k = 2^k + 2k + 1$, из которых требуется провести дополнительно $2k + 1$ опыт.

Определим величину «звездного» плеча \mathbf{a} , обеспечивающую полную ортогональность плана второго порядка, введя преобразование:

$$x_i \phi = x_i^2 - \frac{1}{N_k} \sum_{u=1}^{N_k} x_{iu}^2 = x_i^2 - \bar{x}_i^2$$

и, приравняв к нулю скалярное произведение:

$$\sum_{u=1}^{N_k} x_i \phi x_{iu} \phi = 0,$$

решим выражение (3.26) относительно \mathbf{a} .

В общем случае выражение (3.26) можно записать в виде:

$$N(1 - a)^2 - 4a(a^2 - a) + (N_k - N - 4)a^2 = 0,$$

где N и N_k – число строк соответственно плану первого порядка и построенного на его основе композиционного плана второго порядка

$$a = \bar{x}_i^2 = \frac{N + 2a^2}{N_k}.$$

Из уравнения (3.27) получаем простую формулу для вычисления величины «звездного» плеча:

$$\mathbf{a}^2 = \frac{-N + \sqrt{NN_k}}{2}. \quad \mathbf{a} = 1,215.$$

Составление плана второго порядка иллюстрирует пример матрицы композиционного ортогонального плана типа 2^3 (табл. 3.9), в которой приняты следующие обозначения: $\gamma_1 = -\bar{x}_i^2 = -0,73016$; $\gamma_2 = 1 + \gamma_1 = 0,26984$; величина «звездного» плеча $a = 1,215$; $\gamma_3 = a^2 + \gamma_1 = 0,74606$.

Опыты с комбинациями факторов, которые заданы строками 1...8 табл. 3.9, представляют собой ПФЭ типа 2^3 (табл. 3.4). Кроме опыта в центре плана (строка 9), дополнительно требуется провести шесть опытов в «звездных» точках – строки 10...15 табл. 3.9.

В последней строке таблицы, не имеющей отношения к матрице планирования, приведены суммы $\sum_{j=1}^{N_k} \dot{\mathbf{a}}_{ju}^2$, используемые при вычислении коэффициентов регрессии.

Результаты дополнительных опытов по плану второго порядка берем из исходных данных (табл. 3.5).

После проведения опытов выполняем статистическую обработку данных.

Таблица 3.9

Матрица ортогонального плана типа 2^3 второго порядка

Номер опыта	Кодовые значения факторов									
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1^2 + g_1$	$x_2^2 + g_1$	$x_3^2 + g_1$	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3
1	+1	-1	-1	-1	g_2	g_2	g_2	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1	-1	g_2	g_2	g_2	-1	-1	+1
3	+1	-1	+1	-1	g_2	g_2	g_2	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	-1	g_2	g_2	g_2	+1	-1	-1
5	+1	-1	-1	+1	g_2	g_2	g_2	+1	-1	-1
6	+1	+1	-1	+1	g_2	g_2	g_2	-1	+1	-1
7	+1	-1	+1	+1	g_2	g_2	g_2	-1	-1	+1
8	+1	+1	+1	+1	g_2	g_2	g_2	+1	+1	+1
9	+1	0	0	0	g_1	g_1	g_1	0	0	0
10	+1	-a	0	0	g_3	g_1	g_1	0	0	0
11	+1	+a	0	0	g_3	g_1	g_1	0	0	0

Номер опыта	Кодовые значения факторов									
	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1^2 + g_1$	$x_2^2 + g_1$	$x_3^2 + g_1$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$
12	+1	0	-a	0	g_1	g_3	g_1	0	0	0
13	+1	0	+a	0	g_1	g_3	g_1	0	0	0
14	+1	0	0	-a	g_1	g_1	g_3	0	0	0
15	+1	0	0	+a	g_1	g_1	g_3	0	0	0
$\hat{a}_u x_{ju}^2$	15	10,95			4,36			8		

Находим по формуле (3.26) среднее значение результатов i -го опыта \bar{y}_i , данные записываем в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Среднее значение результатов по дополнительным опытам

Номер опыта	9	10	11	12	13	14	15
\bar{y}_i	7,19	6,76	7,94	6,95	7,4	7,82	7,15

Определяем ошибки повторных опытов.

Данные расчета по формуле (3.27) среднеквадратического отклонения S_u^2 сводим в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Среднеквадратические отклонения результатов

Номер опыта	9	10	11	12	13	14	15
S_u^2	$8,11 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$5,89 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$4,75 \cdot 10^{-2}$	0,21	$4,41 \cdot 10^{-2}$

Гипотеза об однородности дисперсий $s^2\{y_u\}$ при одинаковом числе повторностей во всех вариантах опыта проверяется с использованием критерия Кохрена (3.29).

Максимальное значение дисперсии $s^2\{y_u\}_{\max} = 0,21$.

Сумма дисперсий $\mathring{\mathbf{a}} \sum_{u=1}^N s^2 \{y_u\} = 0,85$.

Вычислим

$$G = \frac{s^2 \{y_u\}_{\max}}{\mathring{\mathbf{a}} \sum_{u=1}^N s^2 \{y_u\}} = \frac{0,21}{0,85} = 0,25.$$

Критическое значение критерия Кохрена определяем путем интерполирования

$$G_{\mathbf{a};n_u;N} = 0,33.$$

$$G = 0,25 < G_{\mathbf{a};n_u;N} = 0,33.$$

Условие критерия выполняется, следовательно, дисперсии однородны.

Поскольку дисперсии однородны, можно вычислить дисперсию воспроизводимости опытов по формуле:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\mathring{\mathbf{a}} \sum_{u=1}^N S_u^2}{N} = 4,99 \times 10^{-2}.$$

Коэффициенты уравнения регрессии в виде полинома второго порядка

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_k x_k + b_{12} x_1 x_2 + b_{(k-1)k} x_{k-1} x_k + b_{11} (x_1^2 - \bar{x}_1^2) + b_{kk} (x_k^2 - \bar{x}_k^2)$$

вычисляются по формуле (3.31).

При этом оценка свободного члена уравнения регрессии вычисляется по формуле (3.32):

$$b_0 = 7,21.$$

Коэффициенты регрессии, рассчитанные по вышеприведенным выражениям, запишем в табл. 3.12.

Значения коэффициентов уравнения регрессии

x_i	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$
b_i	7,21	0,47	0,21	-0,3	$1,37 \cdot 10^2$	$-2,87 \cdot 10^2$	$-1,25 \cdot 10^3$	$8,77 \cdot 10^2$	0,18	$-3,08 \cdot 10^{-2}$

По формуле (3.35) находим границы доверительных интервалов для коэффициентов регрессии.

Дисперсия воспроизводимости опытов вычислена ранее $S^2\{y\} = 4,99 \cdot 10^{-2}$.

$$S^2\{b_{k01}\} = \frac{S^2\{y\}}{n \mathring{a}(x_{i,0})^2}; \quad S(x_{i,0})^2 = 15; \quad S^2\{b_{k01}\} = 1,27 \times 10^{-3}.$$

Критическое значение t – распределения при двустороннем ограничении, доверительной вероятности $\gamma = 0,95$ и $n_g = N_k(n - 1) = 30$

$$t_{\gamma; n_g} = 2,04.$$

Доверительный интервал для b_{ii}

$$S^2\{b_{k11}\} = \frac{S^2\{y\}}{n \mathring{a}(x_{i,7})^2}; \quad S(x_{i,7})^2 = 4,36; \quad S^2\{b_{k11}\} = 4,36 \times 10^{-3};$$

$$Db_{k11} = S\{b_{k11}\} t_k = 0,13.$$

Доверительный интервал для b_i

$$S^2\{b_{k1}\} = \frac{S^2\{y\}}{n \mathring{a}(x_{i,1})^2}; \quad S(x_{i,1})^2 = 10,95; \quad S^2\{b_{k1}\} = 0,023;$$

$$Db_{k1} = S\{b_{k1}\} t_k = 8,5 \times 10^{-2}.$$

Доверительный интервал для b_{ij}

$$S^2\{b_{k12}\} = \frac{S^2\{y\}}{n \mathring{a}(x_{i,14})^2}; \quad S(x_{i,4})^2 = 8; \quad S^2\{b_{k12}\} = 0,032;$$

$$Db_{k12} = S\{b_{k1}\} t_k = 9,95 \times 10^{-2}.$$

Доверительный интервал для b_0

$$S^2 \{b_{k0}\} = S^2 \{b_{k01}\} + 3g^2 S^2 \{b_{k11}\} = 8,23 \times 10^{-3};$$

$$Db_{k12} = S \{b_{k0}\} t_k = 0,19.$$

Вычисленные доверительные интервалы коэффициентов регрессии записываем в табл. 3.13.

Таблица 3.13

Доверительные интервалы коэффициентов регрессии

b_j	b_0	b_i	b_{ii}	b_{ij}
Db_j	0,19	$8,5 \cdot 10^{-2}$	0,13	$9,95 \cdot 10^{-2}$

Сравнивая коэффициенты регрессии с доверительными интервалами, отбрасываем незначимые коэффициенты регрессии и получаем уравнение:

$$y = 7,21 + 0,47x_1 + 0,21x_2 - 0,3x_3 + 0,18x_1x_3. \quad (3.44)$$

Для проверки адекватности полученного уравнения воспользуемся критерием Фишера.

Вычисляем теоретические значения параметра y_p , величину ошибки $Dy = \% - y_p$, результаты запишем в табл. 3.14.

Таблица 3.14

Расчетные значения мощности механических потерь

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
Значение y_p , кВт	7,09	7,99	7,48	8,45	6,48	7,39	6,88	7,84
Номер опыта	9	10	11	12	13	14	15	–
Значение y_p , кВт	7,21	6,77	7,91	6,91	7,43	7,85	7,11	–

Расчитываем дисперсию адекватности по формуле (3.37):

$$s_{ad}^2 = 6,5 \times 10^{-3},$$

принимая n_1 – число коэффициентов уравнения регрессии равным 8.

Критическое значение F – распределения для $\alpha = 0.05$, $n_{ad} = N_k - n_1 = 15 - 8 = 7$ и $n_e = N_k (n - 1) = 15 (3 - 1) = 30$ находим по приложению 3 [38, с. 470] $F_{\alpha, n_{ad}, n_e} = 2.34$.

Адекватность модели определяем по критерию Фишера

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_{(d)}^2} = \frac{6,5 \times 10^{-3}}{4,99 \times 10^{-2}} = 0,13 < F_{\alpha, n_{ad}, n_e} = 2,34.$$

Следовательно, модель адекватно описывает результаты эксперимента.

Для натуральных переменных в общем виде уравнение имеет вид:

$$N_{mnk} = B_0 - B_1 N_{mn0} + B_2 \bar{v} - B_3 T_m + B_{12} N_{mn0} T_m. \quad (3.45)$$

Для натуральных переменных с учетом значения коэффициентов

$$N_{mnk} = 10,12 - 0,314 N_{mn0} + 0,046 \bar{v} - 0,14 T_m + 0,014 N_{mn0} T_m. \quad (3.46)$$

Поясним физический смысл математической модели. Полученное уравнение показывает взаимосвязь мощности механических потерь N_{mnk} двигателя в конце обкатки с такими факторами, как мощность механических потерь в начале обкатки, температура масла в процессе обкатки и средняя скорость изменения мощности механических потерь. На выходной параметр перечисленные факторы влияют пропорционально, на что указывают линейные эффекты. С увеличением значений факторов N_{mn0} и \bar{v} мощность механических потерь увеличивается, а с увеличением температуры – снижается. Наибольшее влияние оказывает N_{mn0} , наименьшее – \bar{v} .

Для натуральных переменных аналогично (3.46) уравнение для двигателей ЯМЗ-238М имеет вид:

$$N_{mnk} = 10,61 - 0,05 N_{mn0} + 0,045 \bar{v} - 0,14 T_m + 0,01 N_{mn0} T_m. \quad (3.47)$$

ГЛАВА 4

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ОБКАТКИ

4.1. Анализ режимов приработки автотракторных двигателей при ремонте

До настоящего времени не имеется еще достаточно простой и обоснованной методики проведения приработки поверхностей трения двигателей, поэтому и наблюдается многообразие режимов заводской обкатки [26, с. 181; 56].

Сложная взаимосвязь и механизмы явлений при приработке ДВС, их главные количественные характеристики до сих пор остаются невыясненными, а, следовательно, не созданы предпосылки для направленного изменения процессов с целью последующей оптимизации приработки. Это обуславливает необходимость математического моделирования, дальнейшего развития и углубления теоретических и экспериментальных исследований данного процесса [123, с. 4; 124; 125].

Наиболее совершенна методика экспериментально-теоретического обоснования режима обкатки, предложенная Г. П. Шароновым [32, с. 171], которая уточнена другими авторами [44, с. 38; 10] применительно к разработке режимов обкатки как дизельных, так и карбюраторных двигателей. В основе этого метода лежит обоснование этапов обкатки по удельным нагрузкам, действующим в основных, трудно прирабатываемых сопряжениях кривошипно-шатунного механизма двигателя, с последующим экспериментальным уточнением продолжительности отдельных этапов обкатки по стабилизации износа деталей, температур трения, прорыва газов и других показателей. Исходные данные для расчета удельных нагрузок определяются тепловым расчетом рабочего процесса или индицированием двигателя на режимах прокрутки, холостого хода и под нагрузкой.

Исследование режимов приработки предусматривает поиск совокупности динамики скоростного, нагрузочного и температурного режимов работы двигателя, при которой достигаются минимально возможные начальные износы.

Эксплуатационными испытаниями установлено, что срок службы капитально отремонтированных и обкатанных по рациональному режиму двигателей увеличивается на 25–30 % по сравнению с такими же двигателями, обкатанными по режиму технических условий [85, с. 4; 34, с. 114].

Логично предположить, что нужно стремиться к максимальному изменению (нарастанию) частоты вращения и нагрузки в ходе приработки, не допуская при этом, чтобы на каждом ее этапе значение критерия заедания превосходило критическое. В таком случае будет обеспечена минимальная продолжительность приработки и предотвращено заедание деталей при трении, т. е. достигнуто оптимальное решение по режиму приработки ДВС.

В конечном счете задача сводится к решению целевой функции

$$P \longrightarrow P_{\text{опт}} \quad (4.1)$$

$$P = f(t, n, N_{\text{мн}0}, N_T, T_M), \quad (4.2)$$

где P – состояние приработанной поверхности в результате обкатки;

$P_{\text{опт}}$ – оптимальное состояние приработанной поверхности;

t – продолжительность приработки, мин;

N_T – тормозная мощность на стенде, кВт;

n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин^{-1} ;

$N_{\text{мн}0}$ – мощность механических потерь в начале обкатки, кВт;

T_M – температура масла, °С.

Следовательно, выбор режима обкатки двигателя состоит в установлении рациональных значений независимых переменных $t, n, N_{\text{мн}0}, N_T, T_M$ в уравнении (4.2) для реализации целевой функции (4.1).

Очевидно, что даже при ограничениях численных значений $t, n, N_T, N_{\text{мн}0}, T_M$ в реальных условиях, количество их сочетаний будет достаточно большим. Кроме того, уравнение (4.2) не учитывает влияния многочисленных конструктивных и технологических факторов, которые, в свою очередь, подвержены статистическим вариациям.

С другой стороны, режим обкатки двигателей на всех ремонтных предприятиях не может быть одинаковым. Условия приработки деталей зависят от технологических возможностей каждого предприятия и уровня культуры производства. Даже на одном предприятии продолжительность приработки не может совпадать для всех отремонтированных двигателей, так как в подготовленных для стендовой обкатки двигателях одноименные детали не имеют абсолютно одинаковые чистоту поверхности, размеры, а сопряжения – одинаковые зазоры или натяги.

Действительно, анализ режимов стендовой обкатки двигателей ЯМЗ моделей 236 и 238 показал их значительные расхождения друг от друга (табл. 4.1–4.9).

Общими для всех приведенных режимов являются трехстадийная обкатка, состоящая из холодной приработки, приработки на холостом ходу и под нагрузкой, а также ступенчатое изменение нагрузки и частот вращения коленчатого вала.

Существенные различия в режимах обкатки наблюдаются на всех стадиях. Например, холодная приработка проводится и в два и в три этапа.

Таблица 4.1

Режим обкатки двигателя ЯМЗ-238 [27, с. 56, табл. 3]

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, Н	Продолжительность обкатки, мин
Холодная	500–600	-	35
- -	700–800	-	30
- -	900–1000	-	25
На холостом ходу	1200	-	15
Горячая под нагрузкой	1550	55	15
То же	1550	80–100	15
- -	1600–1650	110–120	15
- -	1700	350	10
- -	1800	480	10
- -	1900	520	15
- -	2100	630	15
- -	2100	700	15
ИТОГО:			215

Таблица 4.2

Режим обкатки двигателя ЯМЗ-238 [27, с. 56, табл. 4]

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, Н	Продолжительность обкатки, мин
Холодная	600	-	30
- -	800	-	25
- -	1000	-	10
На холостом ходу	1200	-	15

Окончание таблицы 4.2

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, Н	Продолжительность обкатки, мин
Горячая под нагрузкой	1550	150 – 170	15
То же	1600–1650	250 – 270	10
- -	1700	500 – 520	10
- -	1800	720 – 750	10
- -	1900	760 – 780	10
- -	2000	780 – 800	10
ИТОГО:			145

Таблица 4.3

Режим обкатки двигателя ЯМЗ-236
(Тулаевский экспериментальный ремонтный завод)

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт	Продолжительность обкатки, мин
Холодная	800	-	5
- -	1000	-	5
- -	1200	-	5
- -	1400	-	5
На холостом ходу	1500	-	5
Горячая под нагруз.	1600	22	10
То же	1700	44	10
- -	1800	66	10
- -	1900	88	10
- -	2000	110	5
- -	2100	110	5
ИТОГО:			75

Таблица 4.4

Режим обкатки двигателя ЯМЗ-236 [70, с. 81, таблица 14]

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт	Продолжительность обкатки, мин
Холодная	400–600	-	15
- -	800–1000	-	20
На холостом ходу	1000–1200	-	20

Окончание таблицы 4.4

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт	Продолжительность обкатки, мин
То же	1500–2000	-	15
Горячая под нагрузкой	1600–1800	11–15	25
То же	2000–2200	29–44	25
ИТОГО:			120

Таблица 4.5

Режим обкатки двигателей ЯМЗ-236, ЯМЗ-238 [126, с. 23]

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт		Продолжительность обкатки, мин
		ЯМЗ-236	ЯМЗ-238	
Холодная	800	-	-	5
- -	1200	-	-	10
- -	1400	-	-	5
На холостом ходу	1500	-	-	5
Горячая под нагрузкой	1600	22	29	10
То же	1700	44	60	15
- -	1800	66	88	15
- -	1900	88	118	20
- -	2000	110	147	20
- -	2100	110	147	15
ИТОГО:				120

Таблица 4.6

Режим обкатки двигателей ЯМЗ-236, ЯМЗ-238 [127, с. 256]

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт		Продолжительность обкатки, мин
		ЯМЗ-236	ЯМЗ-238	
Холодная	500–600	-	-	40
- -	700	-	-	30
На холостом ходу	1000	-	-	15
Горячая под нагрузкой	1700	44	60	25
То же	1800	52	68	20
- -	1900	78	90	30
- -	2000	104	137	20
ИТОГО:				180

Таблица 4.7

Режим обкатки двигателей ЯМЗ-236, ЯМЗ-238 [85, с. 45]

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт		Продолжительность обкатки, мин
		ЯМЗ-236	ЯМЗ-238	
Холодная	500	-	-	40
- -	700	-	-	30
На холостом ходу	1000	-	-	15
Горячая под нагрузкой	1100	28	37	25
То же	1300	38	50	20
- -	1500	61	81	30
- -	1700	93	75	20
ИТОГО:				180

Таблица 4.8

Режим обкатки двигателей ЯМЗ-236, ЯМЗ-238 [39, с. 93]

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт		Продолжительность обкатки, мин
		ЯМЗ-236	ЯМЗ-238	
На холостом ходу	1200	-	-	10
- -	1400	-	-	15
Горячая под нагрузкой	1500	14,6	22,0	15
То же	1600	22,0	29,3	15
- -	1700	44,0	58,6	15
- -	1800	65,9	87,9	15
- -	1900	87,9	117,2	10
- -	2000	109,9	146,5	10
- -	2100	109,9	146,7	5
ИТОГО:				110

Таблица 4.9

Режим обкатки двигателей ЯМЗ-236 (ЯМЗ-236М), ЯМЗ-238 (ЯМЗ-238М) [120, с. 200]

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт		Продолжительность обкатки, мин
		ЯМЗ-236	ЯМЗ-238	
Холодная	800	0	0	20
- -	1200	0	0	20
- -	1400	0	0	10
Всего:				50
На холостом ходу	1500	0	0	10

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт		Продолжительность обкатки, мин
		ЯМЗ-236	ЯМЗ-238	
Горячая под нагрузкой	1600	22	30	10
То же	1700	44	60	10
- -	1800	66	88	5
- -	1900	88	110	5
- -	2000	102	138	5
Всего:				35
ИТОГО:				95

При этом минимальная частота вращения коленчатого вала изменяется в диапазоне от 400 до 800, максимальная – от 700 до 1400 мин⁻¹. Продолжительность первого этапа холодной приработки колеблется от 5 до 40, а общее время – от 15 до 90 минут.

Так, по данным [27, с. 56, табл. 3], горячая под нагрузкой обкатка двигателей ЯМЗ-236, ЯМЗ-238 осуществляется за восемь этапов, по данным [39, с. 93, табл. 4.33] – за семь, по данным [120, с. 200, табл. 7.1] – за пять этапов, по [85, с. 45; 127, с. 256] – за четыре, а по данным [70, с. 81, табл. 14] – за два этапа. При этом продолжительность горячей обкатки под нагрузкой составляет от 35 до 110 минут, а процесс обкатки начинается с частот вращения от 1100 до 1700 мин⁻¹ и заканчивается от 1700 до 2200 мин⁻¹. Начальные нагрузки изменяются в пределах от 11 до 44 (ЯМЗ-236) и от 22 до 60 (ЯМЗ-238) кВт, а конечные – от 29 до 110 и от 44 до 147 кВт соответственно. Таким образом, по приведенным примерам начальные нагрузки при горячей обкатке варьируются в пределах 8,1–33,2 % (ЯМЗ-236) и 9,2–34 % (ЯМЗ-238) от номинальной мощности двигателя, а конечные 21,9–83,1 % и 24,9–83,3 % соответственно.

В работе [32] рекомендуется нагрузку на завершающем этапе горячей обкатки доводить до 35–40 %, а в [64, с. 11, табл. 3] – до 80–85 % от максимальной мощности двигателя. По данным [8, с. 45], обкатка должна заканчиваться при нагрузке, равной максимальной мощности двигателя.

В широких пределах варьируется общая продолжительность обкатки – от 75 до 215 минут. В значительном диапазоне изменяется и продолжительность горячей обкатки при максимальных нагрузках – от 5 до 25 минут. Однако на этом этапе наблюдается тенденция к снижению времени обкатки до 10, а в ряде случаев до 5 минут. Такое положение наблюдается в [64, с. 18], ряд фирм обкатку двигателей на максимальных нагрузках проводит кратковременно в течение 10, 5 и даже 2 минут.

У отремонтированных двигателей Минского и Ярославского моторных заводов продолжительность обкатки в 1,5–2,4 раза больше по сравнению с новыми (табл. 1–6 Приложения А), а нагрузки на последних этапах составляют не более 80–90 % от номинальной мощности.

На рис. 4.1 и 4.2 приведены зависимости тормозной мощности N_T от времени обкатки t и частоты вращения коленчатого вала n для двигателей ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238, полученные по данным существующих режимов обкатки (табл. 4.1, 4.2, 4.4–4.7, 4.9). Анализ кривых 1–11 на рис. 4.1 и 4.2 показывает существенные различия в динамике нагружения двигателя при горячей обкатке.

Тормозная мощность и удельные давления должны изменяться линейно. Резкий скачкообразный рост нагрузки может вызвать задиры или заедание поверхностей трения в процессе приработки [38, 128]. Поэтому линейный, плавный характер изменения удельных давлений считается обоснованным.

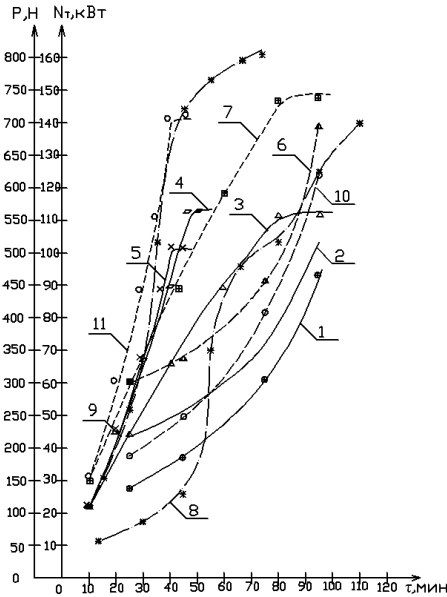


Рис. 4.1. Зависимость тормозной мощности N_T (кривые 1–7, 10, 11) и тормозной силы P (кривые 8, 9) от времени обкатки t
 1, 2, 3, 4, 5 – двигатель ЯМЗ-236 (по данным табл. 4.4–4.7, 4.9);
 6, 7, 10, 11 – двигатель ЯМЗ-238 (по данным табл. 4.5–4.7, 4.9);
 8, 9 – двигатель ЯМЗ-238 (по данным табл. 4.2)

Однако характер изменения тормозной нагрузки не всегда соответствует характеру изменения давлений на основные пары трения.

В связи с этим возникает необходимость оценки влияния каждой стадии обкатки на начальный износ и качество приработки несущих поверхностей деталей двигателя.

Первой стадией обкатки двигателя является холодная приработка. При холодной приработке происходит интенсивное изменение микро- и макрогеометрии поверхностей трения с большими удельными износами, которые могут достигать от 20 до 70 % за весь обкаточный период [27, с. 56].

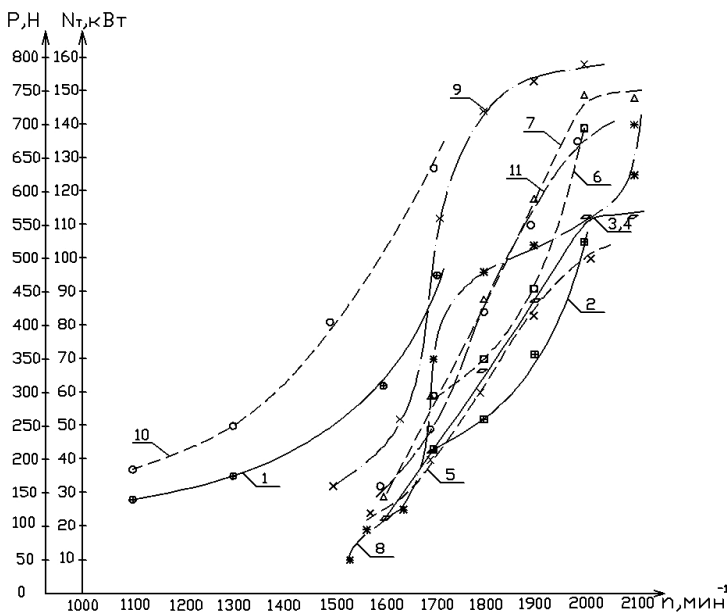


Рис. 4.2. Зависимость тормозной мощности N_t (кривые 1–7, 10, 11) и тормозной силы P (кривые 8,9) от частоты вращения коленчатого вала n
 1, 2, 3, 4, 5 – двигатель ЯМЗ-236 (по данным табл. 4.4–4.7, 4.9);
 6, 7, 10, 11 – двигатель ЯМЗ-238 (по данным табл. 4.5–4.7, 4.9);
 8, 9 – двигатель ЯМЗ-238 (по данным табл. 4.2)

В связи с этим режимам стадии холодной приработки следует придавать большее значение. Сокращения длительности и высокого качества приработки на этой стадии можно достичь проведением ее на малых скоростях скольжения деталей, так как при этом износ возрастает по

сравнению с износом при высоких скоростях, а удельные давления в парах трения на малых и средних оборотах у дизельных двигателей сразу принимают высокие значения – до 13 МПа [85, с. 37].

Но, с другой стороны, и интенсивное охлаждение прирабатываемых поверхностей затрудняется из-за низкой производительности масляного насоса при оборотах двигателя менее 500 мин⁻¹.

При повышении частоты вращения коленчатого вала на стадии холодной обкатки толщина масляного слоя увеличивается, и качество прирабатываемых поверхностей возрастает. Этим достигается лучшая герметичность цилиндров благодаря прилегаемости поршневых колец к зеркалу гильзы цилиндра и к поверхностям поршневых канавок. При последующей горячей обкатке уменьшается прорыв газов с высокой температурой через сопрягаемые поверхности поршневых колец, гильз и поршней, а, следовательно, и их нагрев. Уменьшается также прорыв газов из камер сгорания в картер и проникновение масла из картера в камеры сгорания. Смесь сгорает более полно, образуется меньше нагара на поверхностях поршней и клапанов.

Кроме того, с увеличением скорости скольжения поверхностей трения уменьшается время, но возрастает частота контактирования микровыступов сопрягаемых поверхностей, вследствие чего увеличиваются путь и работа трения в единицу времени. При этом повышение скорости пластического деформирования микровыступов приводит к быстрому заполнению впадин микронеровностей металлом.

В этих случаях износ сопровождается избирательным переносом металла с образованием тонких защитных пленок, приработка узлов трения ускоряется с образованием сравнительно небольших масс продуктов износа [56].

При уменьшении скорости скольжения с частотой вращения микровпадины заполняются большей частью не металлом за счет его пластического деформирования, а продуктами износа, окислами, поэтому приработка поверхностей трения ухудшается с образованием глянцеvitости, заполирования. При увеличении нагрузки приработка такой поверхности начинается заново из-за низкой несущей способности заполированного глянцеvitого слоя, и время приработки возрастает.

При холодной обкатке действуют только инерционные силы, и характер изменения давлений от них на сопряжения «поршень–гильза» и «шейка коленчатого вала–вкладыша» в зависимости от частоты вращения коленчатого вала примерно одинаков [85, с. 39].

Ограничение максимальных значений частот вращения при холодной обкатке обусловлено максимальным суммарным уровнем давлений в указанных сопряжениях. Как видно из рис. 4.3, при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$, давления начинают падать, а при достижении частоты вращения значения, равного 1400 мин^{-1} и более, процесс приработки сопряжения «поршень – гильза» замедляется.

Дальнейшее повышение частоты вращения коленчатого вала при холодной обкатке нерационально, так как будут прирабатываться лишь те поверхности трения, которые подвержены воздействию инерционных сил (вал–подшипник).

Следующей стадией стендовой обкатки двигателей является обкатка на холостом ходу. На этой стадии удельные давления в сопряжениях незначительно отличаются от холодной обкатки (см. рис. 4.3). Прирост их от воздействия небольших газовых давлений на поршневые кольца является несущественным.

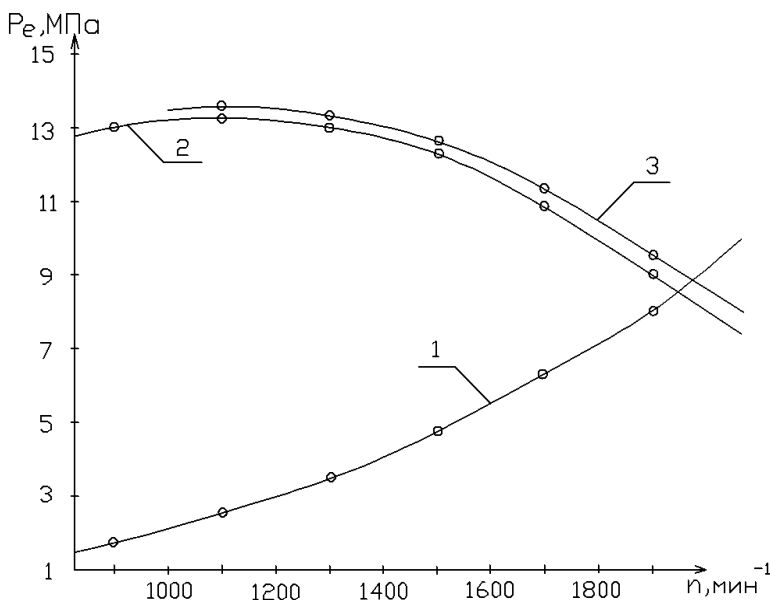


Рис. 4.3. Изменение суммарных максимальных давлений, действующих на пару трения «шатунная шейка–подшипник» в зависимости от режима работы двигателя ЯМЗ-238 [85, с. 37]:

- 1 – инерционные нагрузки; 2 – режимы холодной обкатки;
- 3 – режим холостого хода

Поэтому нецелесообразно проводить обкатку на холостом ходу на тех частотах вращения коленчатого вала, на которых закончена холодная приработка, а необходимо идти по пути равномерного повышения частоты вращения. Но поскольку при обкатке на холостом ходу при высоких частотах вращения инерционные силы недостаточно компенсируются нагрузками от давления газов, то, как следствие, происходит повышенный износ сопряжения «шатунная шейка – вкладыш», перегрузка и повреждение подшипников коленчатого вала, особенно, если последний не сбалансирован. Одновременно увеличивается мощность трения в подшипниках и трущиеся поверхности не успевают охлаждаться смазочным маслом [50, с. 37]. Таким образом, обкатка на холостом ходу при высоких частотах вращения не только нерациональна, но и может привести к отрицательным последствиям.

Обкатка только на холостом ходу не может обеспечить удовлетворительную прирабатываемость поршневых колец и гильз. Из-за относительно низких температур и неполного сгорания топлива, смывания масляной пленки и повышенного трения при незначительных газовых нагрузках на поршневые кольца возникает глянцевитость зеркал гильз цилиндров. Глянцевитость повышает расход масла и приводит к потере мощности. Во избежание этого явления после обкатки двигателя на холостом ходу обязательна обкатка под нагрузкой.

Продолжительность обкатки на холостом ходу ограничивается временем, необходимым для прогрева двигателя к последующей обкатке под нагрузкой, так как установлено, что холодной обкатки достаточно для подготовки поверхностей трения для работы в нагруженном режиме [27, с. 57].

Заключительная стадия обкатки – это горячая обкатка под нагрузкой. Если при работе двигателя на холостом ходу силы давления газов в цилиндре малы и практически не компенсируют инерционные силы, а действие максимальных инерционных сил проявляется на каждом обороте коленчатого вала, то под нагрузкой – через один оборот на такте расширения (рабочего хода). При высоких частотах вращения коленчатого вала инерционные нагрузки в большей степени уравновешиваются силами давления газов [86, с. 237].

Однако при этом алгебраическая сумма инерционных сил и газового давления остается значительной, определяющей приработку пар трения на этой стадии обкатки. В этой связи во избежание

задилов несущих поверхностей необходимо обеспечить плавное повышение давлений относительно действующих на предшествующей стадии или этапе обкатки. Для обеспечения требуемой прирабатываемости трущихся пар в процессе обкатки они должны подвергнуться значительным нагрузкам. С этой целью частоту вращения коленчатого вала необходимо повышать до значений, близких к максимальным.

4.2. Исследование динамики изменения температуры масла, содержания продуктов износа в масле и мощности механических потерь в процессе обкатки при ремонте

4.2.1. Методика и порядок проведения испытаний

Обкатка дизелей, прошедших ремонт в соответствии с нормативно-технической документацией, осуществлялась на обкаточно-тормозном стенде модели КИ-5274-ГОСНИТИ. При этом проверялось соответствие технической документации основных деталей, характеризующих техническое состояние двигателя. Контролю подвергались размеры, микрогеометрические отклонения деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма (КШМ) – гильзы цилиндров, поршни, поршневые кольца, коленчатый вал, подшипники коленчатого вала и шатунов, шероховатость, а также зазоры в основных сопряжениях.

Техническое состояние двигателя в целом (качество сборки ЦПГ и КШМ), в первом приближении, оценивалось начальной мощностью механических потерь. В зависимости от величины этого параметра принималось решение о готовности двигателя к технологической стендовой обкатке и испытаниям.

В качестве основных оценочных показателей, характеризующих степень приработки, были приняты:

1. Величина и интенсивность износа деталей.
2. Мощность механических потерь.
3. Температура масла в картере.
4. Прилегаемость поверхностей пар трения.
5. Удельный расход топлива в конце обкатки.

Величина и интенсивность износа контролировались методом спектрального анализа. Сущность метода состоит в том, что пробы

моторного масла сжигаются в электрической дуге между графитовыми электродами, и возникающее излучение после обработки оптическим и электрическим устройствами дает информацию о присутствии в пробе элементов износа и других примесей.

Содержание железа в масле оценивалось на фотоэлектрической установке МФС-3 при температуре 23 °С, токе 4,5А, обжиге в течение 15 с и экспозиции – 20 с. Пробы масла для спектрального анализа брались перед его заливкой в двигатель, на этапе приработки через 5 или 10 минут в зависимости от продолжительности этапа, а также после каждого этапа приработки.

Отбор проб масла производился шприцем с набором наконечников из картера двигателя через отверстие масломерной линейки с уровня, который находится на 25–30 мм ниже отметки на масломерной линейке, указывающей минимально допустимый уровень масла. В каждый двигатель перед обкаткой заливалось свежее масло.

Температура воды и масла измерялась лагометром типа Ш-69006 с точностью $\pm 1,5$ %, предел измерения 0–150 °С, давление воды и масла в системе охлаждения и смазки – прибором полупроводниковым, показывающим ВМД-4882-01 с точностью $\pm 1,0$ %, предел измерения 0–1МПа.

Частота вращения определялась измерителем цифровым тахометрическим ТЦ 10-4 с точностью $\pm 0,5$ %, предел измерения 50–9999 мин⁻¹.

Измерение крутящего момента осуществлялось маятниковым силоизмерительным механизмом обкаточного стенда с точностью $\pm 1,0$ %, предел измерения 0–1800Нж, который оттарирован в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

Расход топлива измерялся с точностью $\pm 1,0$ % устройством для замера топлива обкаточного стенда с циферблатными весами.

В процессе обкатки температура охлаждающей воды поддерживалась в следующих пределах: на стадии холодной обкатки 55 \pm 5 °С, горячей 70 \pm 10 °С, температура масла при горячей обкатке 80–95 °С, при максимальном нагрузочном режиме температура воды не превышала 90 °С, масла – 100 °С.

Мощность механических потерь $N_{мн}$ определялась для каждого двигателя, подлежащего обкатке, до начала и после окончания каждого этапа приработки при частоте вращения коленчатого вала 500 мин⁻¹ по формуле [110, с. 23; 64, с. 43]:

$$N_{\text{мп}} = M_{\text{кр}} \times n / 9550, \text{ кВт},$$

где $M_{\text{кр}}$ – крутящий момент, Нм;

n – частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} .

Крутящий момент двигателя $M_{\text{кр}}$, в свою очередь, рассчитывается как

$$M_{\text{кр}} = P_{\text{вес}} \times l,$$

где $P_{\text{вес}}$ – показание измерительного устройства стенда, Н;

$l = 0,716\text{ м}$ – плечо весового устройства стенда.

Измерения показателей двигателя производились трижды. В протокол вносили среднее арифметическое значение результатов трех измерений, которые не должны отличаться одно от другого более чем на 2 % [129, с. 3; 110, с. 12].

Обкатка и испытание двигателей проводились по последовательному плану. Первоначально обкатка выборки двигателей осуществлялась по наиболее продолжительному режиму (табл. 4.6), затем по промежуточному (табл. 4.10) и самому кратковременному режиму (табл. 4.9).

4.2.2. Результаты испытаний

О динамике износа судим по изменению содержания железа в обкаточном масле. Результаты измерения содержания железа в обкаточном масле в зависимости от продолжительности обкатки и частоты вращения коленчатого вала обкатываемых двигателей приведены на рисунках 4.4 и 4.5.

Износ по этапам приработки по продолжительному режиму (см. табл. 4.6) распределился следующим образом:

для двигателя ЯМЗ-236М (кривая I, рис. 4.4) – холодная приработка – 28, на холостом ходу – 10, горячая под нагрузкой – 62 % ;

для двигателя ЯМЗ-238М (кривая I, рис. 4.5) – холодная приработка – 31, на холостом ходу – 6, горячая под нагрузкой – 63 % .

Следовательно, износ протекает весьма неравномерно, и основная его доля приходится на этап горячей приработки.

При этом средняя интенсивность износа при холодной обкатке составляет 0,7 и 0,93 г/т×мин, а при горячей обкатке под нагрузкой – 1,15 и 1,58 г/т×мин или превышает в 1,6 и 1,7 раза для двигателей ЯМЗ-236М и ЯМЗ-238М соответственно.

Наибольшая интенсивность износа возникает на первой ступени горячей приработки при частоте вращения коленчатого вала 1700 мин⁻¹ и равна 2,2 г/т×мин при тормозной мощности 44 кВт для ЯМЗ-236М и 1,8 г/т×мин при тормозной мощности 60 кВт для ЯМЗ-238М.

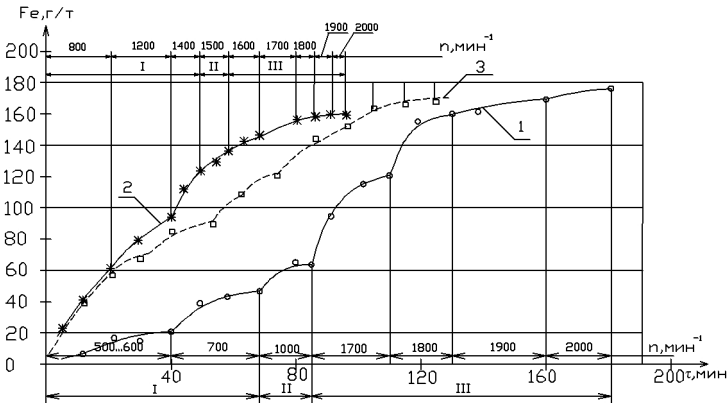


Рис. 4.4. Динамика износа двигателя ЯМЗ-236М:
1 – режим обкатки по табл. 4.6; 2 – режим обкатки по табл. 4.9;
3 – режим обкатки по табл. 4.10

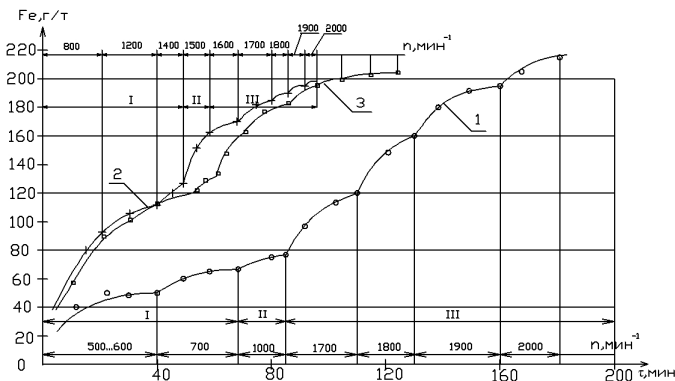


Рис. 4.5. Динамика износа двигателя ЯМЗ-238М:
1 – режим обкатки по табл. 4.6; 2 – режим обкатки по табл. 4.9;
3 – режим обкатки по табл. 4.10

Появление такого существенного износа на первой ступени горячей приработки сопровождается скачкообразным ростом температуры масла. Если прирост температуры масла за весь период обкатки двигателя, то есть за 180 мин составил 45 °С, то за первую ступень горячей обкатки под нагрузкой продолжительностью 25 мин – 15 °С (рис. 4.6).

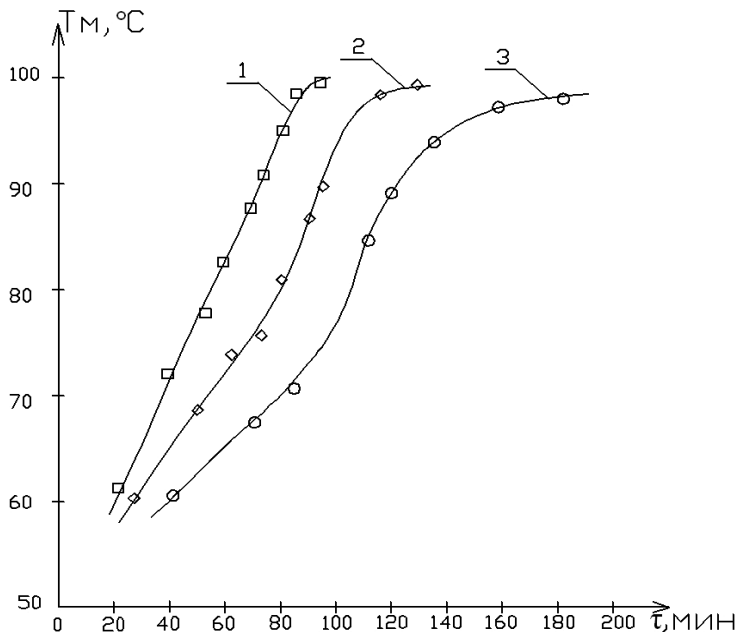


Рис. 4.6. Зависимость температуры масла T_M от времени приработки t двигателя ЯМЗ-236М:

1 – сокращенный режим обкатки по табл. 4.9;

2 – режим обкатки по табл. 4.10; 3 – режим обкатки по табл. 4.6

Резкое повышение температуры масла свидетельствует о динамическом изменении нагрузочного режима. Действительно, переход со стадии холостого хода с частотой вращения коленчатого вала, равной 1000 мин^{-1} на стадию горячей приработки с тормозной мощностью 44 кВт и частотой вращения коленчатого вала, равной 1700 мин^{-1} , сопровождается более чем 3-кратным увеличением давлений, действующих на пару трения «шатунная шейка – подшипник» от инерционных сил (см. кривую I рис. 4.3).

Как уже отмечалось, на стадии холодной обкатки при незначительных инерционных нагрузках ($n = 500 - 700 \text{ мин}^{-1}$) и скоростях взаимного скольжения поверхность заполировывается. Она не обладает достаточной прочностью и начинает интенсивно изнашиваться с повышением нагрузок.

С заполированной поверхности ухудшается адсорбция масляной пленки, усиливается граничное трение, повышается температура масла и поверхностей скольжения. Последнее сопровождается вырыванием отдельных частиц металла, местным выкрашиванием антифрикционного слоя коренных вкладышей, задирами поршней с наволакиванием металла на поверхность зеркала цилиндра.

При холодной обкатке на этом режиме амплитуда давлений в парах трения КШМ недостаточна для образования новой микрогеометрии поверхности за счет износа. Этот процесс интенсивно начал происходить только на стадии горячей обкатки под нагрузкой.

На втором этапе горячей обкатки при $n = 1800 \text{ мин}^{-1}$ интенсивность износа продолжает оставаться высокой – $2 \text{ г/т} \times \text{мин}$ при абсолютной величине 40 г/т или 22% от суммарного износа (ЯМЗ-236М).

Только на двух заключительных этапах обкатки начинается формирование новой поверхности, обладающей достаточной несущей способностью. Динамика износа этого периода обкатки характеризуется удельными износами, составляющими 6 и 15% при $n = 1900 \text{ мин}^{-1}$, 4 и 8% при $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ соответственно для двигателей ЯМЗ-238М и ЯМЗ-236М. Относительно незначительные износы в период окончания приработки под нагрузкой дают основание предположить, что вновь сформированные трущиеся поверхности обладают достаточно износостойкой структурой, препятствующей появлению задиров в эксплуатации. Однако при отсутствии явления заполирования поверхностей процесс формирования износостойких структур мог начаться раньше с улучшением качества приработки.

В целях исследования динамики износа разработаны и испытаны промежуточные режимы обкатки (табл. 4.10, 4.11), в которых, по сравнению с продолжительным режимом (см. табл. 4.6), на стадии холодной обкатки существенно повышена частота вращения коленчатого вала, а с сокращенным режимом (см. табл. 4.9) увеличена продолжительность приработки на ступенях.

Таблица 4.10

Промежуточный режим обкатки двигателей ЯМЗ-236М, ЯМЗ-238М

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт		Продолжительность обкатки, мин
		ЯМЗ-236М	ЯМЗ-238М	
Холодная	800	0	0	30
То же	1200	0	0	25
- -	1400	0	0	10
Всего				65
На холостом ходу	1500	0	0	10
Горячая под нагрузкой	1600	22	44	10
То же	1700	44	66	10
- -	1800	66	88	10
- -	1900	88	110	10
- -	2000	102,5	138,5	10
Всего:				50
ИТОГО:				125

Таблица 4.11

Промежуточный режим обкатки двигателей ЯМЗ-236М, ЯМЗ-238М

Стадия и этап обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт		Продолжительность обкатки, мин
		ЯМЗ-236М	ЯМЗ-238М	
Холодная	500	0	-	25
То же	800	0	-	15
- -	1100	0	-	10
Всего				50
На холостом ходу	1200	0	-	10
Горячая под нагрузкой	1500	22	-	10
То же	1600	44	-	10
- -	1700	66	-	10
- -	1800	88	-	10
- -	1900	95	-	5
- -	2000	102,5	-	5
Всего:				50
ИТОГО:				110

При разработке промежуточного режима преследовалась цель частично сместить центр тяжести процесса изнашивания из области горячей в область холодной обкатки, не увеличивая абсолютных значений износа за весь период приработки, обеспечить его более равномерное распределение по этапам и избежать появления глянцевого покрытия поверхностей.

Отличительными особенностями этих режимов от принятого продолжительного режима обкатки (см. табл. 4.6) являлись введение 3-этапной приработки на стадии холодной обкатки с увеличением частоты вращения коленчатого вала в конце холодной обкатки до 1100 (см. табл. 4.11) и 1400 мин⁻¹ (см. табл. 4.10), а на стадии холостого хода – до 1200 (см. табл. 4.11) и 1500 мин⁻¹ (см. табл. 4.10). Начальная частота вращения коленчатого вала при горячей обкатке под нагрузкой составила 1600 (табл. 4.10) и 1500 мин⁻¹ (см. табл. 4.11) вместо 1700 мин⁻¹ (см. табл. 4.6). При этом перепад давлений от инерционных сил на пару трения «шатунная шейка–подшипник» при переходе от холодной к горячей обкатке под нагрузкой сократился с 3-кратного до 1,5. В целом произошло сглаживание режима нагружения.

Суммарные давления на шатунную шейку на стадиях холодной обкатки и холостого хода незначительно отличаются друг от друга, причем максимальные давления создаются в диапазоне частот вращения коленчатого вала 800–1500 мин⁻¹ и с дальнейшим увеличением частоты вращения заметно снижается (рис. 4.3). Поэтому на этапе холостого хода это значение принято равным 1500 (см. табл. 4.10) и 1200 мин⁻¹ (см. табл. 4.11).

На стадии горячей приработки под нагрузкой режим обкатки задавался исходя из условия равномерного линейного приращения тормозной мощности.

При этом среднее эффективное давление [110, с. 23]:

$$P_e = \frac{0,03 \times \tau_d \times N_T}{V_h \times i},$$

где P_e – среднее эффективное давление на каждом этапе горячей приработки под нагрузкой, МПа;

τ_d – тактность дизеля;

V_h – рабочий объем одного цилиндра, м³;

i – число цилиндров, шт.

Для двигателя ЯМЗ-236М при $V_h \cdot i = 11,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$

$$P_e = 10,75 \frac{N_T}{n}$$

Для двигателя ЯМЗ-238М при $V_n \cdot i = 14,88 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$

$$P_e = 8,07 \frac{N_T}{n}$$

Выбор соотношений N_T и n проводится с таким расчетом, чтобы зависимость $P_e = f\left(\frac{N_T}{n}\right)$, имела линейный характер.

Эта зависимость, приведенная на рис. 4.7, совпадает с характером износа поршневых колец, так как последний пропорционален среднему эффективному давлению P_e [44, с. 40; 75].

При испытаниях двигателей по промежуточному режиму было отмечено, что принятая на стадии холодной обкатки продолжительность этапов (30 и 25 мин) приводила к образованию на кривой износа горизонтальных участков, свидетельствующих о стабилизации интенсивности износа и повышении прочности физико-механических свойств пары трения «поршневое кольцо – гильза цилиндра» [130].

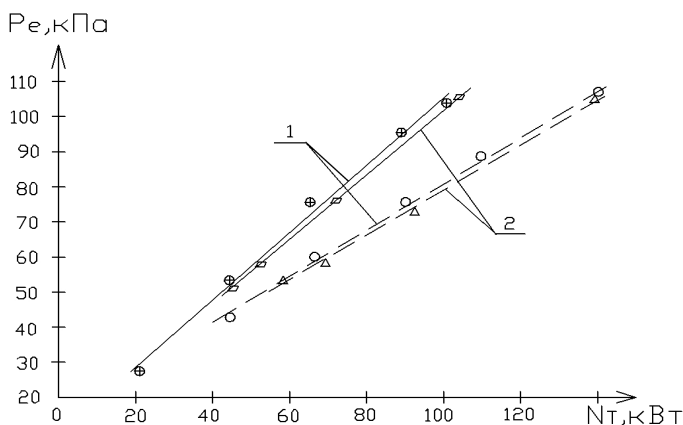


Рис. 4.7. Зависимость среднего эффективного давления P_e от тормозной мощности N_T :

1 – сокращенный режим обкатки по табл. 4.9 и 4.10;

2 – режим обкатки по табл. 4.6

— двигатель ЯМЗ-236М; — — — двигатель ЯМЗ-238М

Поэтому время обкатки каждого из первых двух этапов может быть сокращено. Кроме того, на этапах при частоте вращения коленчатого вала 1900 и 2000 мин⁻¹ износ наблюдается не значительно (кривые 3 на рис. 4.4 и 4.5). Это обусловлено тем, что на таких частотах вращения коленчатого вала инерционные нагрузки в значительной степени уравниваются силами давления газов [89, с. 6].

Динамика износа сокращенного режима обкатки (табл. 4.9) проиллюстрирована кривыми 2 на рис. 4.4 и 4.5. Относительные износы по стадиям приработки распределились следующим образом:

для двигателя ЯМЗ-236М – холодная приработка – 70, на холостом ходу – 9, горячая под нагрузкой – 21 %;

для двигателя ЯМЗ-238М – холодная приработка – 62, на холостом ходу – 18, горячая под нагрузкой – 20 %. В продолжительном режиме приработки (табл. 4.6) эти величины были соответственно равны 28, 10, 62 %, и 31, 6, 63 %. В промежуточном режиме для двигателя ЯМЗ-236М – 64, 9, 27 % и для ЯМЗ-238М – 63, 13, 24 %.

Продолжительность сокращенного режима обкатки меньше продолжительного на 47 %, промежуточного режима на 31 % и составляет 95 мин. Сравнение кривых 1, 2 и 3 (рис. 4.4, 4.5) позволяет отметить, что динамика изменения износов при данном варианте приработки более благоприятная, чем по продолжительному (табл. 4.6) и промежуточному режимам (табл. 4.10), поскольку в ней практически отсутствуют зоны длительной стабилизации интенсивности износа (горизонтальные участки на кривых 1, 3) и обеспечивается плавное и, главное, непрерывное нарастание износов.

Максимальная интенсивность изнашивания происходит в период холодной приработки – 2,4 и 2,6 г/т×мин. Более высокие износы в этот момент опасны усилением абразивного воздействия частиц износа и образованием значительных участков адгезионного взаимодействия (микрореконтактного схватывания).

Динамика износа заключительного периода приработки ($n = 1900, 2000$ мин⁻¹) характеризуется следующими относительными значениями для двигателя ЯМЗ-236М – 2 и 1%, а для двигателя ЯМЗ-238М – 4 и 2 %.

Для сравнения по продолжительному (см. табл. 4.6) режиму эти значения составляют 4 и 8 % (ЯМЗ-236М), 6 и 15 % (ЯМЗ-238М), соответственно.

Наблюдается снижение общего суммарного износа в процессе приработки по сокращенному режиму обкатки на 7 % для двигателя ЯМЗ-236М и 6 % для ЯМЗ-238М, а по промежуточному – на 4 % и 3 % соответственно относительно продолжительного режима.

Уменьшение общего износа и износа на заключительных этапах приработки под нагрузкой при сокращенном режиме по сравнению с продолжительным (см. табл. 4.6) свидетельствует о более благоприятном характере формирования несущих поверхностей и улучшения качества приработки.

Момент окончания процесса стендовой приработки двигателей оценивался также по изменению значения мощности механических потерь $N_{мт}$. На протяжении всего процесса наблюдается уменьшение ее значения, а на заключительных этапах – асимптотическое приближение к оси абсцисс по закону, близкому к экспоненте (рис. 4.8).

От режима приработки существенно зависит и интенсивность снижения мощности механических потерь. Например, на стадии холодной обкатки по продолжительному (см. табл. 4.6) режиму скорость изменения мощности механических потерь минимальна и составляет $1,7 \cdot 10^{-2}$ (ЯМЗ-236М) и $1,9 \cdot 10^{-2}$ (ЯМЗ-238М) кВт/мин. А максимальные ее значения $-2,5 \cdot 10^{-2}$ и $4,0 \cdot 10^{-2}$ кВт/мин соответственно отмечаются на первом этапе горячей приработки под нагрузкой ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$) при тормозной мощности 44 (ЯМЗ-236М) и 60 (ЯМЗ-238М) кВт.

Анализ этих численных значений показывает, что на первом этапе горячей обкатки под нагрузкой интенсивность снижения выше, чем на стадии холодной в 1,5 раза для двигателей ЯМЗ-236М и в 2,1 раза – ЯМЗ-238М.

При обкатке двигателей по сокращенному режиму (см. табл. 4.9) интенсивность снижения $N_{мт}$ относительно продолжительного режима (см. табл. 4.6) на стадии холодной обкатки увеличивается в 1,7 раза, а на этапе горячей под нагрузкой ($n = 1700 \text{ мин}^{-1}$) в 1,4 раза для двигателя ЯМЗ-236М, а для ЯМЗ-238М соответственно в 1,8 и в 1,4 раза. Сопоставление динамики изменения мощности механических потерь с кривыми износа (рис. 4.4 и 4.5), полученными в результате спектрального анализа, обнаруживает их приемлемую сходимость и однозначность описания процесса приработки. Это согласуется с данными других исследователей [62, с. 108].

Равномерность износа при сокращенном режиме приработки подтверждается также близкой к линейной зависимостью температуры масла от времени обкатки, тогда как для продолжительного режима этого не наблюдается (кривые 1 и 3 на рис. 4.6).

Мощности механических потерь за весь цикл стендовой приработки по продолжительному режиму обкатки снизились, в среднем, на 3,0 и 4,3 кВт для двигателей ЯМЗ-236М и ЯМЗ-238М соответственно. При сокращенном варианте обкатки эти показатели составили 2,8 для двигателя ЯМЗ-236М и 4,0 кВт – ЯМЗ-238М. А при обкатке по промежуточному режиму, продолжительностью 125 минут мощность механических потерь после приработки снизилась на 2,9 и 4,1 кВт соответственно (кривые 3 и 6 на рис. 4.8).

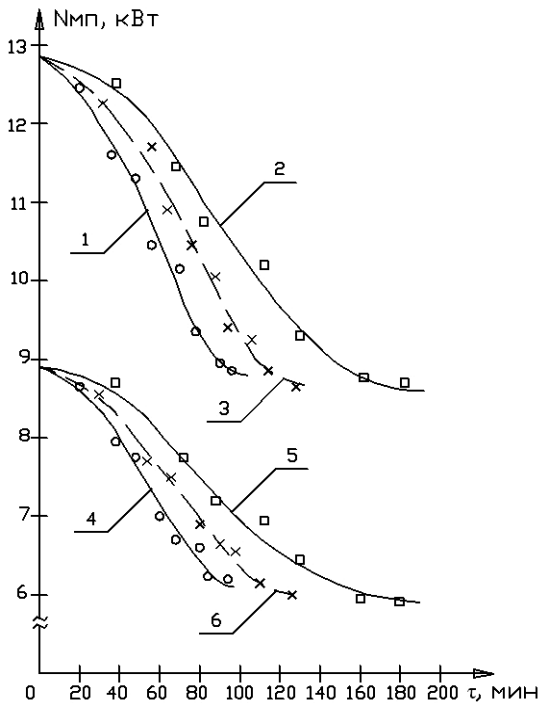


Рис. 4.8. Зависимость мощности механических потерь $N_{мп}$ от времени приработки t :

1, 4 – сокращенный режим приработки (табл. 4.9); 2, 5 – продолжительный режим (табл. 4.6); 3, 6 – промежуточный по длительности режим приработки (табл. 4.10); 1, 2, 3 – двигатель ЯМЗ-238М; 4, 5, 6, – двигатель ЯМЗ-236М

Снижение мощности механических потерь от начального значения в результате стендовой приработки составляет в продолжительном режиме (см. табл. 4.6) для двигателя ЯМЗ-236М – 33,7 %, для двигателя ЯМЗ-238М – 33,5 %, в сокращенном режиме (см. табл. 4.9) для двигателя ЯМЗ-236М – 31,5 %, для двигателя ЯМЗ-238М – 31,1%, а в промежуточном режиме (см. табл. 4.10) для двигателя ЯМЗ-236М – 32,6 % и 31,9 % для двигателя ЯМЗ-238М.

Сокращенный вариант обкатки (см. табл. 4.9) является рациональным на предприятиях с высоким качеством ремонта, промежуточный по длительности (см. табл. 4.10) и продолжительный режим обкатки (см. табл. 4.6) на предприятиях с более низким уровнем технологической обеспеченности и культуры производства.

ГЛАВА 5

СЕЛЕКТИВНОЕ УСТАНОВЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РЕЖИМОВ ОБКАТКИ

5.1. Разработка методики селективного установления продолжительности режимов обкатки

Для совершенствования процесса обкатки необходимо получить методику и алгоритм селективного установления продолжительности режимов приработки процесса послеремонтной стендовой обкатки, что позволит назначить индивидуальную продолжительность приработки поверхностей трения деталей двигателя в зависимости от их технического состояния.

За показатель качества приработки двигателя принимается количественная мера, характеризующая степень близости технического состояния двигателя к состоянию «полностью приработанного двигателя», т. е. двигателя с незначительной наработкой, основные параметры которого (мощность механических потерь, удельный расход топлива, расход масла на угар и др.) стабилизировались и при эксплуатации не будут изменяться в сторону улучшения [123, с. 4].

Для объективной оценки качества приработки важно правильно выбрать базовые значения соответствующих параметров. Наиболее просто и точно этот вопрос решается при наличии достаточного количества экспериментальных данных о значениях соответствующих параметров для полностью приработанных двигателей. В этом случае в качестве базового значения принимаются модальные значения параметров в имеющейся выборке, предварительно проверена однородность этих данных с помощью статистических критериев.

Существующие режимы обкатки рассчитаны на двигатель после ремонта с усредненными выходными параметрами, без учета индивидуальных показателей. И, как показала практика, некоторые двигатели достигают состояния обкатанных за более короткое время, а отдельные, с большей мощностью механических потерь в начале обкатки, не успевают приработаться, перегреваются и даже выходят из строя – заклинивают. Исходя из этого, поставлена задача: на основе рационального режима получить методику и алгоритм селективного установления продолжительности режимов приработки процесса послеремонтной стендовой обкатки дизелей в зависимости от их технического состояния.

В качестве информационного параметра приработанности трущихся поверхностей деталей обкатываемого двигателя выбрана мощность механических потерь, которая определяется на фиксированной частоте вращения по показанию весового механизма обкаточного стенда методом прокручивания коленчатого вала от электродвигателя с учетом частоты вращения. Правильность такого выбора подтверждается в работах [68; 88; 86, с. 78].

Исследования главы 3 показали, что на мощность механических потерь в процессе обкатки наибольшее влияние оказывают мощность механических потерь в начальный момент обкатки, температура масла и средняя скорость изменения мощности механических потерь.

Поэтому была поставлена задача получения уравнения, описывающего изменение мощности механических потерь $N_{мт}$ в процессе обкатки в зависимости от времени обкатки t , мощности механических потерь в начальный момент обкатки $N_{мт0}$, температуры масла T_m и средней скорости изменения мощности механических потерь \bar{v} в процессе обкатки.

В условиях ремонтного завода на обкаточном стенде исследованы закономерности изменения параметров дизелей ЯМЗ-236М в процессе послеремонтной обкатки по четырем известным режимам (см. табл. 3.6, 3.9–3.11). Полученные экспериментальные данные приведены в табл. 4.1–4.4.

Проведенные исследования [62, с. 79; 74, с. 144] показали, что для двигателей, прошедших обкатку по различным технологиям, изменяется скорость изменения параметров, а характер их взаимосвязи в процессе обкатки остается практически постоянным.

Различные режимы обкатки двигателей внутреннего сгорания характеризуются средней скоростью \bar{v} (Вт/мин) изменения мощности механических потерь в процессе обкатки, которую можно определить по формуле:

$$\bar{v} = \frac{(N_{мт0} - N_{мтк}) \times 10^3}{t}, \quad (5.1)$$

где $N_{мт0}$ – мощность механических потерь в начале обкатки, кВт;

$N_{мтк}$ – мощность механических потерь в конце обкатки, кВт;

$t_{об}$ – время обкатки, мин.

Найдем скорости изменения режимов обкатки u_n^* на каждом из временных интервалов $[t_n, t_{n+1}]$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) по формуле:

$$u_n^* = \frac{(N_{mn} - N_{mn+1}) \times 10^3}{\tau_{n+1} - \tau_n}, \quad (5.2)$$

где t_n, t_{n+1} – границы временных промежутков, мин;

N_{mn}, N_{mn+1} – мощность механических потерь в соответствующих точках, кВт.

Таблица 5.1

Параметры двигателя в процессе обкатки по режиму табл. 3.6

Наименование показателей	Значение показателей														
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅
Вариант опыта A _i	0	0	0	40	40	40	80	80	80	120	120	120	180	180	180
Время обкатки t, мин	49	50	52	63	64	66	76	77	79	88	89	92	97	98	99
Температура масла T _м , °С	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Средняя скорость изменения мощности механических потерь \bar{v} , Вт/мин	8,25	8,92	9,92	8,25	8,92	9,92	8,25	8,92	9,92	8,25	8,92	9,92	8,25	8,92	9,92
Мощность механических потерь в начале обкатки N _{мн0} , кВт	8,25	8,92	9,92	7,84	8,36	9,32	6,73	7,25	8,47	5,95	6,28	7,46	5,48	5,91	6,63
Мощность механических потерь в конце обкатки N _{мк} , кВт															

Таблица 5.2

Параметры двигателя при обкатке по режиму табл. 3.10

Наименование показателей	Значение показателей														
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	B ₁₀	B ₁₁	B ₁₂	B ₁₃	B ₁₄	B ₁₅
Вариант опыта B _i	0	0	0	40	40	40	80	80	80	120	120	120	125	125	125
Время обкатки t, мин	49	52	51	58	70	66	73	84	82	94	98	98	99	100	100
Температура масла T _м , °С	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Средняя скорость изменения мощности механических потерь \bar{v} , Вт/мин															

Наименование показателей	Значение показателей														
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉	V ₁₀	V ₁₁	V ₁₂	V ₁₃	V ₁₄	V ₁₅
Вариант опыта V ₁															
Мощность механических потерь в начале обкатки N _{мпо} , кВт	8,18	8,90	9,66	8,18	8,90	9,66	8,18	8,90	9,66	8,18	8,90	9,66	8,18	8,90	9,66
Мощность механических потерь в конце обкатки N _{мп} , кВт	8,18	8,90	9,66	7,62	7,80	8,47	6,59	6,81	7,44	5,81	6,35	6,95	5,74	6,25	6,84

Таблица 5.3

Параметры двигателя при обкатке по режиму табл. 3.11

Наименование показателей	Значение показателей											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
Вариант опыта C ₁												
Время обкатки t, мин	0	0	0	40	40	40	80	80	80	110	110	110
Температура масла T _м , °C	52	50	49	72	71	71	88	91	95	100	100	101
Средняя скорость изменения мощности механических потерь V, Вт/мин	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Мощность механических потерь в начале обкатки N _{мпо} , кВт	8,51	9,32	10,14	8,51	9,32	10,14	8,51	9,32	10,14	8,51	9,32	10,14
Мощность механических потерь в конце обкатки N _{мп} , кВт	8,51	9,32	10,14	7,96	8,29	9,21	6,48	6,99	7,90	6,09	6,62	7,22

Параметры двигателя в процессе обкатки по режиму табл. 3.9

Наименование показателей	Значение показателей											
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈	D ₉	D ₁₀	D ₁₁	D ₁₂
Вариант опыта D _i												
Время обкатки t, мин	0	0	0	40	40	40	80	80	80	95	95	95
Температура масла T _н , °C	54	52	52	73	76	74	94	94	95	100	100	100
Средняя скорость изменения мощности механических потерь P, Вт/мин	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
Мощность механических потерь в начале обкатки N _{мех0} , кВт	8,47	9,19	9,95	8,47	9,19	9,95	8,47	9,19	9,95	8,47	9,19	9,95
Мощность механических потерь в конце обкатки N _{мех} , кВт	8,47	9,19	9,95	7,34	8,04	8,72	6,23	6,88	7,46	6,00	6,55	7,18

Так как значение мощности механических потерь через вязкость зависит от температуры масла в процессе обкатки (2.15) или [68; 131, с. 47], которая, в свою очередь, зависит от температуры в начале обкатки, введем новую переменную T , равную разности между текущим и начальным значениями температуры масла.

$$T = T_m - T_{m0},$$

где T_{m0} – температура масла в начале обкатки, °С.

Проведя вычисления по приведенным выше формулам, преобразуем табл. 5.1–5.4 исходных данных в табл. 5.5–5.8.

Среднее значение n^* для исследуемых режимов за весь промежуток обкатки равно $\bar{v} = 17; 21; 25; 28$ (Вт/мин).

Для каждого из четырех режимов построим интерполяционную формулу зависимости мощности механических потерь от начальной мощности N_{m0} , времени t , разности температур масла T и средней скорости изменения мощности механических потерь \bar{v} .

Поскольку переменная \bar{v} принимает четыре значения, соответствующие четырем сравниваемым режимам обкатки, то, рассматривая ее как функцию переменных t , T_m и N_{m0} , построим поверхности уровня этой функции, соответствующие четырем заданным значениям: $\bar{v} = 17$, $\bar{v} = 21$, $\bar{v} = 25$, $\bar{v} = 28$ Вт/мин (см. табл. 5.1–5.4). Линейную интерполяцию функции N_{m0} как функции двух переменных t и T_m (при фиксированном \bar{v}) проводим по формуле, аналогичной формуле [138, с. 59] для функции вида $z = f(x, y)$:

$$z = \frac{D_0 - D_1x - D_2y}{D_3}, \quad (5.3)$$

$$\text{где } D_0 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}, \quad D_1 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}, \quad D_2 = \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \end{vmatrix}, \quad D_3 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix},$$

$(x_\kappa, y_\kappa, z_\kappa)$, $\kappa = 1; 2; 3$ – координаты узлов интерполирования.

В результате мы получили четыре цепочки плоскостей [82].

Аналогично формуле (4.3), выведем интерполяционную формулу для случая функции $u = f(x, y, z)$ трех переменных.

Разложим по элементам первой строки определитель

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \end{vmatrix} &= x(y_2 - y_1) - y(x_2 - x_1) - x_1(y_2 - y_1) - y_1(x_2 - x_1) = \\ &= x \begin{vmatrix} 1 & y_1 \\ 1 & y_2 \end{vmatrix} + y \begin{vmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Параметры двигателя Т и П *, полученные из табл. 5.1

Наименование показателей	Значение показателей														
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅
Вариант опыта А ₁	0	0	0	40	40	40	80	80	80	120	120	120	180	180	180
Время обкатки t, мин	0	0	0	14	14	14	27	29	27	39	39	40	48	48	47
Разность температур Т, °С	0	0	0	10,25	14,0	15,0	27,75	27,75	21,25	19,5	24,0	22,0	7,83	6,33	4,84
Скорость изменения мощности механических потерь П *, Вт/мин	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Параметры двигателя Т и П *, полученные из табл. 5.2

Наименование показателей	Значение показателей														
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	B ₁₀	B ₁₁	B ₁₂	B ₁₃	B ₁₄	B ₁₅
Вариант опыта В ₁	0	0	0	40	40	40	80	80	80	120	120	120	125	125	125
Время обкатки t, мин	0	0	0	9	18	15	24	32	31	45	46	47	50	48	49
Разность температур Т, °С	0	0	0	14,0	27,5	29,75	25,75	24,75	25,75	19,5	11,5	12,25	14,0	20,0	22,0
Скорость изменения мощности механических потерь П *, Вт/мин	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 5.7

Параметры двигателя T и Π *, полученные из табл. 5.3

Наименование показателей	Значение показателей											
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}
Вариант опыта C_1	0	0	0	40	40	40	80	80	80	110	110	110
Время обкатки t , мин	0	0	0	20	21	22	36	41	46	48	50	52
Разность температур T , °С	0	0	0	13,75	25,75	23,25	37,0	32,5	32,75	13,0	12,33	22,67
Скорость изменения мощности механических потерь Π *, Вт/мин	0	0	0									

Таблица 5.8

Параметры двигателя T и Π *, полученные из табл. 5.4

Наименование показателей	Значение показателей											
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}
Вариант опыта D_1	0	0	0	40	40	40	80	80	80	95	95	95
Время обкатки t , мин	0	0	0	19	27	22	40	42	43	46	48	48
Разность температур T , °С	0	0	0	28,25	28,75	30,75	27,75	29,0	31,50	15,33	22,0	18,67
Скорость изменения мощности механических потерь Π *, Вт/мин	0	0	0									

Отсюда следует:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} x & y & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \end{vmatrix}. \quad (5.4)$$

Разложив определитель

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix}$$

по элементам первой строки и используя формулу (5.4), получим:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = x \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} + y \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \end{vmatrix} + z \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}$$

Таким образом, справедлива формула:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} 1 & x & y & z \\ 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad (5.5)$$

Аналогично, используя формулу (5.5) и свойства определителей, получаем интерполяционную формулу:

$$u = \frac{D_0 - D_1 x - D_2 y - D_3 z}{D_4},$$

где $D_0 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & u_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & u_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 & u_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 & u_4 \end{vmatrix},$

$(x_\kappa, y_\kappa, z_\kappa, u_\kappa), \kappa = 1, \dots, 4$ – координаты узлов интерполирования, а определители $D_\kappa (\kappa = 1 - 4)$ получаются из определителя D_0 путем замены κ -го столбца столбцом, состоящим из единиц, т. е.

$$D_1 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 & u_1 \\ 1 & y_2 & z_2 & u_2 \\ 1 & y_3 & z_3 & u_3 \\ 1 & y_4 & z_4 & u_4 \end{vmatrix}, D_2 = \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 & u_1 \\ x_2 & 1 & z_2 & u_2 \\ x_3 & 1 & z_3 & u_3 \\ x_4 & 1 & z_4 & u_4 \end{vmatrix}, D_3 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 & u_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & u_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & u_3 \\ x_4 & y_4 & 1 & u_4 \end{vmatrix},$$

$$D_4 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix}.$$

Рассматривая функцию $x_n = f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ ($n-1$) переменных, можно аналогично получить интерполяционную формулу:

$$u = \frac{D_0 - x_1 D_1 - x_2 D_2 - \dots - x_{n-1} D_{n-1}}{D_n}, \quad (5.6)$$

где $D_0 = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nn} \end{vmatrix},$

$(x_{\kappa 1}, x_{\kappa 2}, \dots, x_{\kappa n})$, $\kappa = 1, \dots, n$ – координаты узлов интерполирования, а определители

D_κ ($\kappa = 1, \dots, n-1$) получаются из D_0 путем замены k -го столбца столбцом из единиц. При выводе этой формулы используется метод математической индукции.

Выберем в качестве узлов интерполирования следующие точки:

при $\bar{v} = 17$ Вт/мин – точки A_5, A_8, A_{12}, A_{15} ;

при $\bar{v} = 21$ Вт/мин – точки B_5, B_8, B_{11}, B_{13} ;

при $\bar{v} = 25$ Вт/мин – точки C_6, C_9, C_{10}, C_{12} ;

при $\bar{v} = 28$ Вт/мин – точки D_6, D_8, D_9, D_{12} .

Получаем четыре интерполяционные формулы, описывающие мощность механических потерь $N_{mn}^{(1)}, N_{mn}^{(2)}, N_{mn}^{(3)}, N_{mn}^{(4)}$ для каждого из четырех режимов:

$$\begin{aligned}
N_{mn}^{(1)} &= N_{mn0} \times (1.07 - 0.0028x + 0.0027xT - 0.0041x^*), \\
N_{mn}^{(2)} &= N_{mn0} \times (1.10 - 0.0058x + 0.0089xT - 0.0048x^*), \\
N_{mn}^{(3)} &= N_{mn0} \times (1.04 - 0.0020x - 0.0020xT - 0.0007x^*), \\
N_{mn}^{(4)} &= N_{mn0} \times (1.03 + 0.0020x - 0.0100xT - 0.0009x^*).
\end{aligned} \tag{5.7}$$

Поскольку в процессе обкатки скорость изменения режимов является кусочно-постоянной, то формулы (5.7) можно использовать для определения мощности механических потерь в процессе обкатки в любой момент времени, при этом скорость \bar{v} берем равной средней скорости изменения мощности механических потерь на соответствующем временном промежутке (формула (5.2)).

Кроме этого, формулы (5.7) мы можем использовать для выбора наиболее подходящего режима обкатки из данных четырех режимов.

Однако формулы (5.7) не позволяют непосредственно назначить режимы, в конце которых мощность механических потерь достигает значения, соответствующего области обкатанных $N_{mn\text{об}} = 6,83$ кВт. Двигатель может оказаться как недообкатанным, так и перекатанным. Поэтому важным является определение необходимого времени обкатки.

Анализ известных режимов показывает, что обкатка завершается при $t > 40$ мин. Выведем универсальную для всех четырех режимов интерполяционную формулу, описывающую зависимость изменения мощности механических потерь N_{mn} от времени t , температуры масла $T = T_m - T_{m0}$, средней скорости изменения мощности механических потерь \bar{v} и мощности механических потерь в начале обкатки N_{mn0} . Используем данные табл. 5.1–5.5.

Выбирая в качестве узлов интерполирования точки D_{11} , C_{11} , B_{11} , A_{11} , A_{14} и, используя формулу (5.6), получим интерполяционную формулу:

$$N_{mn} = 0.452 \times N_{mn0} - 0.008x - 0.015xT - 0.019x\bar{v} + 4.618. \tag{5.8}$$

Формула является универсальной для всех режимов обкатки при $t > 40$ мин.

Проверка точности описания уравнением (5.8) экспериментальных данных проводилась подстановкой в данное уравнение координат промежуточных точек для получения расчетных значений N_{mn} . Сравнение показало, что рассчитанные значения мощности механических потерь

отличались от экспериментальных результатов менее чем на 5 %, следовательно, уравнение (5.8) адекватно описывает изменение мощности механических потерь в процессе обкатки.

Выразим из формулы (5.8) переменную t – время обкатки (мин):

$$\tau = 56,5 \times N_{mn0} - 1,875 \times T - 2,375 \times \bar{t} + 577,25 - 125 \times N_{mn}.$$

Учитывая, что $T = T_M - T_{M0}$, а в конце обкатки дизели, соответствующие области обкатанных двигателей, имеют значение $T_M = 99 \pm 1$ °С и $N_{mn} = N_{mnk} = N_{mnob} = 6,83$ кВт, получим формулу определения необходимой длительности обкатки до достижения требуемого качества приработанности деталей, соответствующим обкатанным дизелям, в зависимости от средней скорости изменения мощности механических потерь (выбранного режима обкатки, наиболее подходящего для данного производства), мощности механических потерь и температуры масла в начале обкатки:

$$\tau = 56,5 \times N_{mn0} - 2,375 \times \bar{t} + 1,875 \times T_{M0} - 462,125. \quad (5.9)$$

Алгоритм селективного установления продолжительности режимов приработки приведен на рис. 5.1.

Для наиболее рационального режима (см. табл. 3.9)

$$\tau = 56,5 \times N_{mn0} + 1,875 \times T_{M0} - 528,625. \quad (5.10)$$

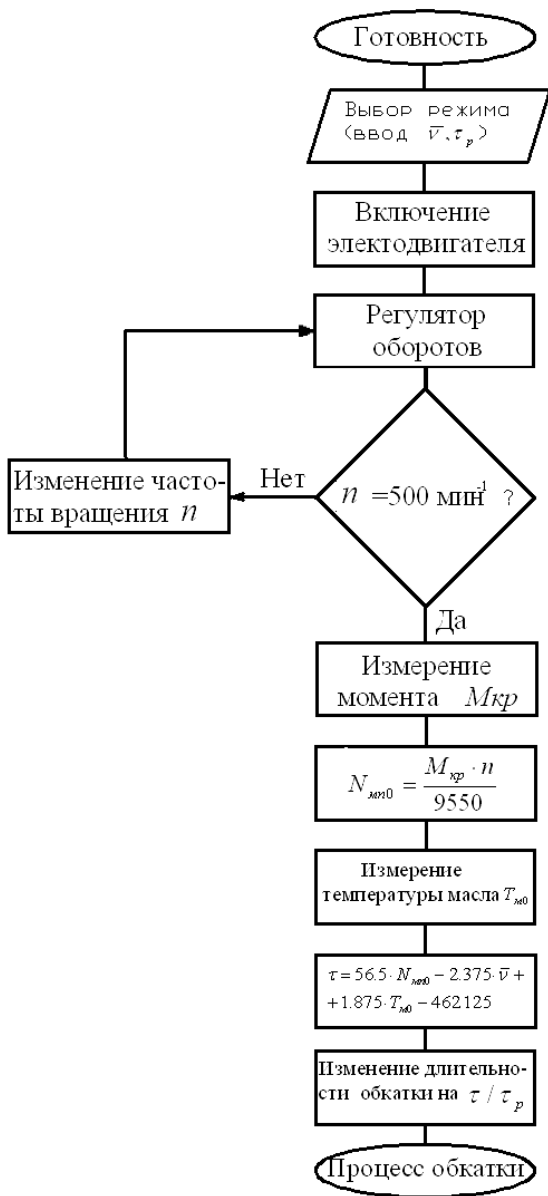


Рис. 5.1. Алгоритм селективного установления продолжительности режимов приработки

Используя эту формулу, определим время, необходимое для обкатки двигателей по наиболее рациональному режиму с $\bar{v} = 28$ Вт/мин, по данным табл. 5.4.

Для первого двигателя $N_{мт0} = 8,47$ кВт с температурой масла в начале обкатки $T_{м0} = 54$ °С вычисленное необходимое время обкатки $t = 51,18$ мин. По режиму табл. 3.9 продолжительность приработки 95 мин, следовательно, все этапы обкатки этого двигателя можно сократить на 46 %.

Для второго двигателя $N_{мт0} = 9,19$ кВт с температурой масла в начале обкатки $T_{м0} = 52$ °С необходимое время обкатки $t = 88,11$ мин. По существующему режиму продолжительность приработки 95 мин, следовательно, все этапы обкатки этого двигателя можно сократить на 7 %.

Для третьего двигателя $N_{мт0} = 9,95$ кВт с температурой масла в начале обкатки $T_{м0} = 52$ °С необходимое время обкатки $t = 131,06$ мин. По существующему режиму продолжительность приработки 95 мин, следовательно, все этапы обкатки этого двигателя нужно удлинить на 38 %, иначе трущиеся поверхности его деталей окажутся недостаточно приработанными. Назначая продолжительность приработки для каждого двигателя, среднее время обкатки можно сократить на 15 % по сравнению с рациональным режимом.

Аналогично, используя формулу (5.7) или (5.8), можем определить по начальной мощности механических потерь и температуре масла необходимую продолжительность обкатки и для других более длительных режимов с $\bar{v} < 28$ Вт/мин, при этом сокращение длительности будет более чем на 30 % [82].

5.2. Разработка автоматизированного обкаточного стенда

Необходимость автоматизации обкатки ДВС заключается в том, что:

- во время обкатки на оператора действуют опасные и вредные производственные факторы (см. главу 1), поэтому важно уменьшить время его нахождения у работающего двигателя;

- скорость вращения электродвигателя и величина тормозной мощности зависят от напряжения силовой сети, которое может колебаться;

- при значительном количестве стендов на ремонтном предприятии трудно совместить максимальную загрузку оборудования с удобством его обслуживания;

- слесарь-испытатель во время обкатки выполняет ряд регулировочных работ и в это время не может постоянно следить за технологическими параметрами;

- на некоторых предприятиях слесарь-испытатель обслуживает несколько стендов, поэтому затруднен контроль хода обкатки;

- труд рабочих оплачивается сдельно и не исключена возможность преднамеренного сокращения продолжительности обкатки.

Следовательно, рекомендованный режим обкатки лучше реализовать на автоматизированном стенде, который ведет постоянный контроль параметров технического состояния ДВС и обеспечивает своевременный переход с одной ступени на другую по заданному алгоритму [53, с. 139; 132].

Нарушение режимов обкатки приводит к снижению ресурса двигателя до 30 % [34, с. 114].

Как отмечалось ранее, автотракторные дизели после капитального ремонта имеют значительный разброс параметров, поэтому и время приработки этих двигателей будет неодинаковым по продолжительности. Обеспечение индивидуализации обкатки позволяет рассчитать необходимую продолжительность приработки деталей для каждого двигателя, пройдя все ступени обкатки со скоростью, необходимой и достаточной для достижения мощности механических потерь, соответствующей обкатанным.

5.2.1. Выбор нагружающего устройства

Как видно из главы 2 (пункт 2.3), на ремонтных предприятиях наибольшее распространение получили требующие модернизации обкаточно-тормозные стенды ГОСНИТИ, комплектующиеся электродвигателем с фазным ротором, к которому подключен жидкостной реостат или тиристорное устройство.

Применение в обкаточно-тормозных стендах асинхронного вентильного каскада (АВК) с тиристорным управлением электроприводом обеспечивает, по сравнению с другими схемами, ряд существенных преимуществ, таких, например, как хорошая управляемость, жесткость механических характеристик, возможность большей рекуперации энергии скольжения (эксплуатационный КПД равен 0,8 против 0,5 для стендов с жидкостным регулировочным реостатом), а также расширение диапазона регулирования путем эффективного использования режима динамического торможения и т. д. [89; 8, с. 65].

На стадии холодной обкатки асинхронная электрическая машина работает в двигательном режиме. Электрическая энергия переменного тока ротора, пропорциональная скольжению, преобразуется выпрямителем в энергию постоянного тока, которая затем преобразуется инвертором в энергию переменного тока с частотой питающей сети. Эта энергия через трансформатор возвращается в питающую сеть.

На стадии горячей обкатки под нагрузкой асинхронная машина работает в режиме генераторного торможения.

Поступающая на вал эффективная мощность двигателя преобразуется машиной в электрическую мощность, часть которой, за вычетом потерь, возвращается в питающую сеть по цепи статора, а другая часть – мощность скольжения – генерируется в обмотках ротора и, за вычетом потерь, после преобразования выпрямителем и инвертором через трансформатор также поступает в питающую сеть. Так как потери в статорной и роторной цепях сравнительно невелики, стенд работает при высоких значениях КПД на всех режимах [106].

Электрическая принципиальная схема управления силовой частью обкаточного стенда с АВК представлена на рис. Б.1 (Приложение Б).

Она состоит из следующих основных элементов:

- асинхронного электродвигателя М1 с фазным ротором;
- вентильного преобразователя VD1–VD12, служащего для выпрямления тока ротора;
- тиристорного преобразователя VS1–VS9, служащего в качестве источника добавочной электродвижущей силы (ЭДС);
- трансформатора TV1, согласующего напряжения сети с напряжением ротора электродвигателя.

Вентили VD1–VD12 работают в выпрямительном режиме, преобразуя переменный ток ротора, имеющий частоту скольжения, в постоянный ток. Управляемые вентили VS1–VS9, выполненные по нулевой схеме, представляют собой три инвертора, которые преобразуют выпрямленный ток ротора в переменный ток с частотой сети.

Разделение тока роторной цепи, обеспечивающее повышение мощности инвертора, а также применение четырехобмоточного трансформатора с компенсационной обмоткой в виде разомкнутого треугольника позволяет уменьшить загрязнение питающей сети высшими гармониками и увеличить $\cos \varphi$.

Работает АВК следующим образом. В двигательном режиме ниже синхронной скорости ток ротора асинхронного двигателя выпрямляется вентилями VD1–VD12. В цепь выпрямленного тока вводится добавочная ЭДС, представляющая собой среднее выпрямленное напряжение инвертора.

Выпрямленное напряжение ротора должно покрывать противо-ЭДС инвертора, падение напряжения на активных сопротивлениях, а также падение напряжения, обусловленного процессом коммутации вентилях. Момент, развиваемый асинхронным двигателем в пределах рабочего участка механической характеристики, пропорционален действующему значению тока ротора.

Изменяя величину противо-ЭДС инвертора, можно регулировать величину момента и частоту вращения электродвигателя. Изменение величины противо-ЭДС инвертора осуществляется изменением угла коммутации тиристора при помощи системы импульсно-фазового управления (СИФУ), принципиальная электрическая схема (рис. Б.2 и Б.3) и описание работы которой приведены в Приложении Б.

При работе с нижесинхронной скоростью потребляемая из сети мощность, за вычетом потерь в статор, передается в воздушный зазор двигателя в виде электромагнитной мощности. Часть ее поступает на вал двигателя и затрачивается на совершение механической работы. Другая часть – мощность скольжения, за вычетом потерь в роторе, вентилях и инверторе, рекуперируется в сеть.

В генераторном режиме при сверхсинхронной скорости поступающая от дизеля механическая мощность преобразуется в электрическую. Часть ее – мощность скольжения, генерируется в обмотках ротора, преобразуется и, за вычетом потерь, поступает в питающую сеть. Другая часть, пропорциональная синхронной скорости двигателя, отдается в статорную цепь двигателя и, за вычетом потерь в статоре, также рекуперируется в сеть.

За счет рекуперации энергии в сеть схема АВК в энергетическом отношении имеет высокую экономичность.

По сравнению с аналогами стенд имеет лучшие технические показатели. Однако вследствие сложности, искажения формы кривой питающего напряжения и высокой стоимости его целесообразно использовать для обкатки и испытания двигателей мощностью свыше 100 кВт на предприятиях с высококвалифицированным электротехническим персоналом и с применением специальных компенсирующих устройств [133].

Внешний вид автоматизированного обкаточного станда с АВК приведен на рис. 5.3.

5.2.2. Разработка схемы управления обкаточно-тормозным стандом

Известно, что за счет оптимизации режимов при сохранении заданного уровня качества приработки автотракторных дизелей удалось на 15 % сократить общее время приработки, повысить производительность труда и коэффициент загрузки оборудования. Применение в процессе обкатки системы автоматического регулирования по частоте вращения и нагрузочному моменту обеспечивает увеличение межремонтного пробега на 3 %, а при автоматическом регулировании и рациональном режиме – на 4,8 % [34 с. 131].

Учитывая сложность, большую стоимость и часто недостаточный уровень квалификации электротехнического персонала ремонтных предприятий, нами было разработано устройство управления обкаткой дизелей на базе простого и надежного станда ГОСНИТИ, которое защищено патентом на изобретение [106].

Эта схема (Приложение В) позволяет реализовать алгоритм выбора необходимой продолжительности обкатки, т. е. задавать и поддерживать продолжительность режимов в зависимости от температуры масла, средней скорости изменения мощности механических потерь, мощности механических потерь в момент измерения и автоматизировать процесс обкатки.

Блок-схема разработанного устройства управления обкаточным стандом представлена на рис. 5.2, внешний вид устройства управления на базе обкаточного станда ГОСНИТИ – на рис. 5.4.

При холодной обкатке режим работы (частота вращения) устанавливается задатчиком 9 частоты вращения по сигналу с первого выхода блока 15 управления. На первом вычитающем элементе 7 сравнивается сигнал задатчика 9 частоты вращения и датчика 3 частоты вращения. На выходе первого вычитающего элемента 7 появляется сигнал, равный разности сигналов на входах, который подается через третий вход переключателя 11 на исполнительный механизм 6 нагрузочного устройства (электродвигателя) 1.

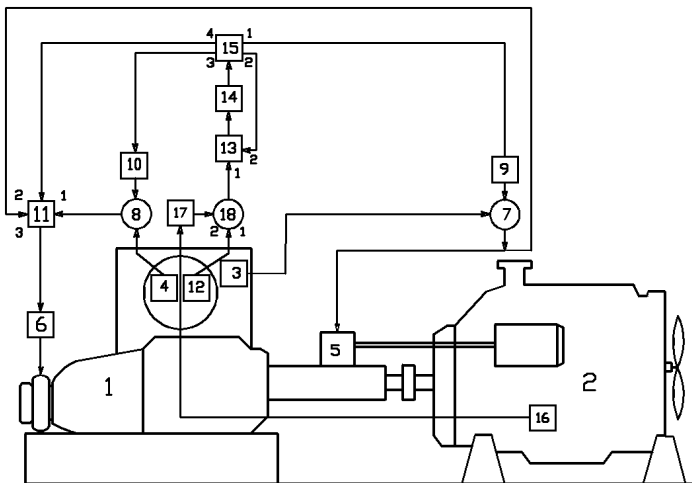


Рис. 5.2. Блок-схема устройства управления стенда для обкатки двигателя внутреннего сгорания:

- 1 – нагрузочное устройство; 2 – обкатываемый двигатель; 3 – датчик частоты вращения; 4 – датчик нагрузочного момента; 5 – исполнительный механизм частоты вращения; 6 – исполнительный механизм нагрузочного устройства; 7 – первый вычитающий элемент; 8 – второй вычитающий элемент; 9 – задатчик частоты вращения; 10 – задатчик нагрузочного момента; 11 – переключатель; 12 – датчик момента сопротивления прокручиванию; 13 – устройство опроса; 14 – блок назначения длительности приработки; 15 – блок управления; 16 – датчик температуры; 17 – линейризатор; 18 – третий вычитающий элемент

Исполнительный механизм 6 нагрузочного устройства, перемещаясь пропорционально сигналу на входе, вызывает увеличение или уменьшение частоты вращения нагрузочного устройства (электродвигателя) 1 и кинематически связанного с ним обкатываемого двигателя 2.

При горячей обкатке под нагрузкой нагрузочным устройством (электродвигателем) 1 изменяется тормозная мощность на валу обкатываемого двигателя 2, а частота вращения регулируется перемещением штока исполнительного механизма 5 частоты вращения и, соответственно, рычага топливodoзирующего органа обкатываемого двигателя 2.

При горячей обкатке в установившемся режиме по частоте вращения сигнал на выходе датчика 3 частоты вращения равен сигналу от задатчика 9 частоты вращения.

Если частота вращения обкатываемого двигателя 2 превышает установленное значение, то сигнал (напряжение) на выходе первого вычитающего элемента 7 вызывает перемещение штока исполнительного механизма 5 и рычага топливodoзирующего органа двигателя 2 на уменьшение частоты вращения. Если частота вращения становится меньше установленного значения, то все процессы происходят в обратном направлении.

Аналогично работает контур управления тормозной мощностью по нагрузочному моменту. На втором вычитающем элементе 8 сравнивается сигнал задатчика 10 нагрузочного момента и датчика 4 нагрузочного момента. Сигнал с выхода второго вычитающего элемента 8 через первый вход переключателя 11 поступает на исполнительный механизм 6 нагрузочного устройства, изменяя сопротивления или противо-ЭДС в цепи фазного ротора, заставляет нагрузочное устройство (электродвигатель) 1, работающее в режиме динамического торможения, изменять величину тормозной мощности (нагрузочного момента).

Требуемые частота вращения и нагрузочный момент устанавливаются задатчиками 9 частоты вращения и 10 нагрузочного момента по команде с выходов 1 и 3 блока 15 управления в соответствии с режимами приработки после ремонта для данного предприятия.

Информационным параметром хода приработки является величина мощности механических потерь, которая, в свою очередь, определяется по показанию датчика 12 момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала на весовом механизме стенда на фиксированной частоте вращения.

Измерение производится на фиксированной частоте вращения с тем расчетом, чтобы каждый раз не учитывать влияние частоты вращения коленчатого вала на мощность механических потерь.

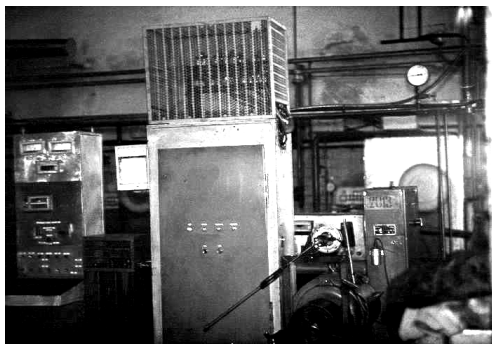


Рис. 5.3. Внешний вид автоматизированного обкаточного стенда с АВК

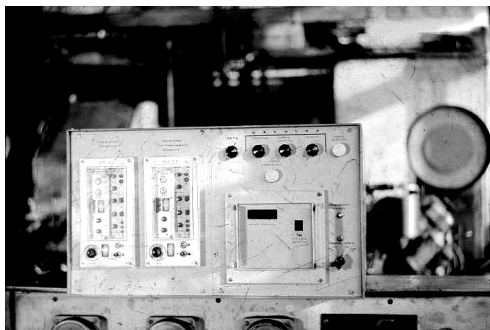


Рис. 5.4. Внешний вид устройства управления на базе обкаточного стенда ГОСНИТИ

Этим уменьшаем число влияющих факторов, объем исследовательских работ и упрощаем алгоритм управления. Но, как показано выше, в процессе обкатки мощность механических потерь существенно зависит от начальной мощности механических потерь, температуры масла обкатываемого двигателя, продолжительности обкатки и средней скорости изменения режимов обкатки.

Для того, чтобы реализовать алгоритм селективного установления продолжительности режимов приработки, сократив общее ее время, измеряют датчиком 12 момент сопротивления прокручиванию коленчатого вала на фиксированной частоте вращения обкатываемого двигателя и датчиком 16 температуру масла обкатываемого двигателя, вычисляют на линеаризаторе 17 мощность механических потерь при данной температуре. Затем на третьем вычитающем элементе 18 сравнивают мощность механических потерь обкатываемого двигателя с мощностью механических потерь, соответствующей обкатанным.

Сигнал, равный разности между величиной мощности механических потерь обкатываемого двигателя при данной температуре и величиной мощности механических потерь обкатанного двигателя с учетом выбранного рационального значения средней скорости изменения мощности механических потерь, с выхода третьего вычитающего элемента 18 поступает на вход устройства 13 опроса, на котором и запоминается. В зависимости от величины этого сигнала блоком 14 назначается продолжительность приработки. Чем меньше эта разность и выше средняя скорость изменения мощности механических потерь, тем меньше время, необходимое для приработки обкатываемого двигателя.

Задатчики и сравнивающие элементы контуров регулирования частоты вращения и тормозной мощности с достаточным качеством регулирования реализованы на базе стандартных пропорционально-интегральных регуляторов (Приложение В), а в случае использования более сложного алгоритма управления – с применением управляющего контроллера.

Расчет параметров настройки регулятора приведен в Приложении Г. Принципиальная электрическая схема с описанием ее работы, монтажная плата с размещением элементов блока приработки автоматизированного обкаточного стенда приведены в Приложении В.

5.3. Производственная проверка технологического процесса обкатки при ремонте автотракторных двигателей

Для получения наиболее объективной оценки качества приработки каждого конкретного двигателя целесообразно использовать результаты измерения его основных параметров, изменяющихся в период приработки: мощность механических потерь и топливной экономичности двигателя. Для повышения достоверности оценок привлекаются также показатели, учитывающие изменение скоростей изнашивания наиболее ответственных сопряжений двигателя (в первую очередь, сопряжения «гильза цилиндров – верхнее уплотнительное кольцо»), температур поверхностей трения и т. д. [123, с. 14].

Внешнее состояние рабочих поверхностей оценивалось с помощью эталонных образцов, утвержденных руководителем ремонтного предприятия [64, с. 28].

На рабочих поверхностях вкладышей не допускается наличие глубоких рисок и натиров. Допускается не более пяти кольцевых рисок глубиной до 0,15 мм и шириной до 0,4 мм. В зоне разъема вкладышей допускается наличие натиров площадью не более $2 \cdot 10^{-4}$ м².

Вкладыши коренных и шатунных подшипников должны иметь приработку по шейкам коленчатого вала площадью не менее 75 % общей поверхности антифрикционного слоя. Не допускается наличие задигов и рисок на поверхности шеек коленчатого вала и наволакивания алюминиевого сплава поршней на зеркале гильз цилиндров.

На зеркале гильз цилиндров допускается наличие отдельных неприработанных полос, видимые на глаз.

Допускаются незначительные задиры на юбках поршней и поршневых кольцах [64, с. 27].

После обкатки дизель подвергался приемо-сдаточным испытаниям [110, с. 2; 64, с. 21]. При этом проверяются следующие параметры:

- максимальная и минимальная устойчивость частот вращения холостого хода;

- давление масла в главной масляной магистрали при номинальной и максимальной частотах на холостом ходу;

- температура охлаждающей жидкости на выходе из дизеля;

- температура масла в главной масляной магистрали;

- эффективная мощность при номинальной частоте вращения и положении органов управления регулятором частоты вращения, соответствующем полной подаче топлива;

- удельный расход топлива при номинальной мощности и положении органов управления регулятором частоты вращения, соответствующем полной подаче топлива.

Эффективная мощность дизеля N_e определяется при положении органов управления регулятором частоты вращения, соответствующем полной подаче топлива, путем последовательного увеличения крутящего момента M_K (нагрузки P_T), начиная с режима, соответствующего максимальной частоте вращения на холостом ходу, и при крутящем моменте (нагрузке), когда частота вращения достигает величины, равной номинальному значению.

Величину крутящего момента M_K (нагрузки P_T) определяют по показаниям шкалы динамометрического устройства стенда, частоту вращения n – по показаниям тахометра.

Удельный расход топлива g_e определяется при положении органов управления регулятором частоты вращения, соответствующем полной подаче топлива, и крутящем моменте (нагрузке), когда частота вращения равна номинальному значению. По показанию секундомера определяют время, в течение которого дизель расходует контрольную массу топлива с весов измерительного устройства.

Контролируемые параметры измерялись трижды. В расчетах использовались средние результаты измерений крутящего момента и расхода топлива.

Если условия испытаний дизеля отличались от стандартных, то полученные при испытаниях эффективная мощность и удельный

расход топлива приводились к стандартным атмосферным условиям и стандартной плотности топлива (по ГОСТ 18509–88).

Контролируемые параметры дизелей, обкатанных селективным установлением продолжительности режимов приработки, соответствовали технологическим требованиям [120; 64, с. 21] и были не ниже, чем по длительному режиму.

После окончания обкатки двигатель подвергался разборке и оценивалась степень приработки поверхностей трения поршневых колец, гильз, поршней, шатунных и коренных шеек коленчатого вала, вкладышей подшипников коленчатого вала и шатунов.

При визуальной оценке поверхности трения по степени приработанности делились на четыре группы [85, с. 49]:

I группа – прилегаемость полная (характеризуется наличием только приработанных рисок, следы мехобработки не наблюдаются);

II группа – прилегаемость неполная (характеризуется наличием преимущественно приработочных рисок, а также следов мехобработки);

III группа – прилегаемость частичная (характеризуется наличием рисок мехобработки и следов приработочных рисок);

IV группа – прилегаемость отсутствует (характеризуется отсутствием приработочных рисок).

Результаты исследований прилегаемости поверхностей пар трения позволяют заключить, что поверхность зеркал цилиндров, компрессионных поршневых колец, шатунных и коренных подшипников, шейки коленчатого вала соответствует второй группе (по принятой классификации) при обкатке двигателей селективным установлением продолжительности режимов. Приработанность поверхностей составляла 75–85 % и, в ряде случаев, превышала качество приработанности длительного режима.

Отсутствие рекламаций производственных организаций, эксплуатировавших данные дизели после ремонта, подтверждает качество селективного установления продолжительности режимов приработки.

Таким образом, режим стендовой технологической обкатки ремонтируемых двигателей ЯМЗ моделей 236М и 238М в зависимости от их технического состояния на основе рационального режима при нагрузках и частотах вращения коленчатого вала, приведенных в табл. 3.9, может быть рекомендован для селективного установления продолжительности режимов приработки и внедрения на ремонтных предприятиях.

Реализация устройства управления стендом для обкатки двигателя внутреннего сгорания с контролем их технического состояния

по мощности механических потерь с учетом температуры масла и скорости изменения режимов нагрузки позволяет сократить среднюю продолжительность обкатки двигателей на 15 %, сэкономить топливно-энергетические ресурсы, уменьшить загрязнение окружающей среды [95].

Предложенная методика, алгоритм и устройства его реализации могут быть использованы для обкатки и других моделей ремонтируемых автотракторных двигателей.

5.4. Оценка экономической эффективности

Первостепенной задачей при модернизации существующего обкаточного стенда предприятия, ремонтирующего автотракторные двигатели, является замена устройства управления, обеспечивающее обкатку автотракторных дизелей в ручном режиме или по жесткой программе, на более совершенное, позволяющее обкатывать двигатели селективным установлением продолжительности режимов приработки в зависимости от их технического состояния.

Однако стоимость нового оборудования может оказаться весьма высокой, что поставит под сомнение эффективность такой замены.

В связи с тем, что обкатка является лишь одной из многочисленных операций по капитальному ремонту двигателя, и как услуга отдельно не предоставляется, то и определить размер прибыли от внедрения научной разработки не просто, поэтому данный вопрос требует детального технико-экономического обоснования.

Некоторые авторы предлагают умножать разность удельных прямых затрат на проектируемый объем производства. На наш взгляд, это не совсем правильно, поскольку рост производительности труда, вызванный предлагаемым совершенствованием стенда, приводит к снижению себестоимости.

Вместе с тем, полный годовой эффект должен учитывать изменения в сумме налога на добавленную стоимость, а также экологический эффект за счет снижения расхода дизтоплива и уменьшения экологического налога.

Исходные данные, методика и результаты экономической оценки эффективности предложенного решения приведены в Приложении Д.

Полученные значения критериальных показателей эффективности капитальных вложений в устройство управления стендом для

обкатки дизелей с контролем их технического состояния по мощности механических потерь свидетельствуют о целесообразности реализации проекта.

Чистый дисконтированный доход при этом для двигателя ЯМЗ-236М составляет 4110 рублей, срок возврата капитальных вложений 2 года при годовой экономии 2,1 тонны дизтоплива и 13340 кВт·ч электроэнергии, годовом экологическом эффекте 266 рублей. Для дизеля ЯМЗ-238М чистый дисконтированный доход составляет 4301 рублей, срок возврата капитальных вложений 1,9 года при годовой экономии 2,3 тонны дизтоплива и 12 018 кВт·ч электроэнергии, годовом экологическом эффекте 289 рублей.

Предлагаемая методика оценки экономической эффективности может быть использована предприятиями, ремонтирующими авто-тракторные двигатели при обосновании решений о модернизации обкаточных стендов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Работа операторов испытательных станций проходит в крайне неблагоприятных условиях, так как двигатель внутреннего сгорания является источником интенсивного шума, повышенных вибраций, вредных газо- и тепловыделений. Необходимо модернизировать стенд для обкатки автотракторных двигателей и сократить продолжительность пребывания работника у обкатываемого двигателя.

2. Теоретический анализ показал целесообразность применения метода контроля приработки поверхностей трения автотракторных дизелей в процессе их стендовой обкатки, который основан на измерении мощности механических потерь по моменту сопротивления прокручиванию коленчатого вала на фиксированной частоте вращения, как наиболее приемлемый в условиях производства.

3. Предложена математическая модель, отличающаяся тем, что позволяет оценить влияние таких факторов, как мощность механических потерь в начале обкатки, температура масла в процессе обкатки и средняя скорость изменения мощности механических потерь на мощность механических потерь двигателя в конце стендовой обкатки.

4. На основании теоретических и экспериментальных зависимостей разработана методика и произведен выбор рационального режима приработки, при котором интенсивность снижения мощности механических потерь, относительно продолжительного режима, на стадии холодной обкатки увеличивается в 1,7 раза, а на этапе горячей под нагрузкой в 1,4 раза для двигателя ЯМЗ-236М, а для ЯМЗ-238М соответственно в 1,8 и в 1,4 раза.

5. В работе впервые исследована зависимость мощности механических потерь в процессе обкатки от времени, температуры масла, средней скорости изменения мощности механических потерь и от мощности механических потерь в начале обкатки.

Получены интерполяционные формулы, которые позволяют определить мощность механических потерь в любой момент времени для соответствующих режимов обкатки, причем рассчитанные значения мощности механических потерь отличались от экспериментальных данных менее чем на 5 %. Получена формула для селективного установления продолжительности обкатки с учетом мощности механических потерь двигателя.

6. Разработан алгоритм селективного установления продолжительности режимов приработки и конструкция стенда для послеремонтной

обкатки автотракторных дизелей, которая запатентована в Республике Беларусь. Средняя продолжительность обкатки сокращается на 15 %. Предложенная методика, алгоритм и устройства его реализации может быть использованы для обкатки и других моделей ремонтируемых автотракторных двигателей.

7. Оценка экономической эффективности показала, что чистый дисконтированный доход при обкатке двигателя ЯМЗ-236М составляет 4110 рублей, срок возврата капитальных вложений 2 года при годовой экономии 2,1 тонны дизтоплива и 13340 кВт·ч электроэнергии, годовом экологическом эффекте 266 рублей. Для дизеля ЯМЗ-238М чистый дисконтированный доход составляет 4301 рублей, срок возврата капитальных вложений 1,9 года при годовой экономии 2,3 тонны дизтоплива и 12 018 кВт·ч электроэнергии, годовом экологическом эффекте 289 рублей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ращупин, А. Исправность техники – залог посева в срок / А. Ращупин, Е. Ерошенко // Белорусское сельское хозяйство. – 2017. – № 1(177). – С. 9–14.
2. Сельское хозяйство. Статистический сборник. – Минск : РУП «ИВЦ Национального статистического комитета РБ», 2017. – 232 с.
3. Соловьев, Р. Ю. Современная концепция обслуживания и ремонта машин / Р. Ю. Соловьев, В. М. Михлин, А. В. Колчин // Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – № 1. – С. 12 – 15.
4. Лабушев, Н. А. В Новый год с надежным партнером / Н. А. Лабушев // Белорусское сельское хозяйство. – 2007. – № 12. – С. 22–24.
5. Иванов, В. П. Сбережение остаточного ресурса деталей и сопряжений при их восстановлении / В. П. Иванов // Агропанорама. – 2000. – № 2 – С.15–18.
6. Автоматическое устройство для оценки приработанности двигателя внутреннего сгорания : а. с. 1796957 СССР, МКИ5 G 01 M 15/00 / Л. З. Батхан, А. З. Батхан, В. А. Бородкин, А. В. Рожанский ; Минск. моторн. з-д и Центр. науч.-исслед. ин-т мех. и эл. с.-х. – № 4707653 ; заявл. 19.06.89 ; опубл. 23.02.93 // Открытия. Изобрет. – 1993. – № 7. – С. 31.
7. Модернизация изношенных двигателей фирмы «Caterpillar» // Техника и оборудование для села. – 2007. – № 2. – С. 39.
8. Механизация и автоматизация на сельскохозяйственных ремонтных предприятиях / Н. И. Бохан [и др.]. – Минск : Ураджай, 1985. – 133 с.
9. Устройство для очистки изделий : пат. на пол. модель 783 Респ. Беларусь, МПК 7 G 01 M 15/00 / В. Г. Андруш, А. В. Крутов, И. М. Мацкевич, Л. В. Мисун, А. И. Федорчук ; заявитель Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – № u 20020199 ; заявл. 12.07.02 ; опубл. 30.12.02. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2002. – № 4. – С. 229.
10. Карпович, С. К. Охрана труда: как повысить эффективность и снизить травматизм? / С. К. Карпович, Н. А. Гордиенко // Белорусское сельское хозяйство – 2017. – № 8. – С. 24–27.
11. Профилактика профессиональных заболеваний: государственный доклад / Мин. труда и соц. защиты// Всемирный день охр. труда / Минск, 2013 – 16 с.

12. Кравченко, В. Н. Улучшение условий и безопасности труда операторов испытательных станций двигателей внутреннего сгорания / В. Н. Кравченко. – Л., 1984. – 284 с.

13. Цыпцын, Е. А. Повышение качества приработки деталей дизелей за счет применения масла, содержащего наночастицы серпентина / Е. А. Цыпцын. – М., 2007. – 210 с.

14. Богданов, А. Ф. Повышение долговечности отремонтированных дизелей за счет совершенствования технологических методов и применения приработочных присадок к топливу / А. Ф. Богданов. – Саратов, 2003. – 167 с.

15. Карпенков, А. В. Повышение качества обкатки двухтактных двигателей внутреннего сгорания при помощи металлосодержащих присадок к маслу / А. В. Карпенков. – М., 2000. – 226 с.

16. Насибулина, Б. М. Опасности производственной среды и способы защиты от них [Текст] : учебное пособие / Б. М. Насибулина, Е. Г. Локтионова, Т. Ф. Курочкина. – М. : КНОРУС, 2016. – 174 с.

17. Кольчицкий, А. Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей : учебное пособие / А. Р. Кольчицкий. – М. : Академический проект, 2004. – 400 с.

18. Андруш, В. Г. Подходы к выбору методики измерения уровня шума при стендовой обкатке ДВС / В. Г. Андруш, А. К. Евтух // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : сб. статей II Междунар. науч.-практ. конференции; Минск, 26–27 марта 2015 г. / БГАТУ, ред.: В. Я. Груданов [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2015. – С. 196–199.

19. Юдин, Е. Я. Борьба с шумом на производстве : справочник / Е. Я. Юдин [и др.]; под общ. ред. Е. Я. Юдина. – М. : Машиностроение, 1985. – 400 с.

20. Гедроить, Г. И. Снижение шума тракторов / Г. И. Гедроить, А. Ф. Безручко // Агропанорама. – 2016. – № 6. – С. 2–4.

21. Кацнельсон, М. У. Снижение шума машин пищевых производств / М. У. Кацнельсон, Б. А. Селиверстов, И. Е. Цукерников. – М. : Агропромиздат, 1986. – 255 с.

22. Суркин, В. И. Основы теории и расчета автотракторных двигателей. Курс лекций. – СПб. : Издательство «Лань», 2013. – 304 с.

23. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Теория рабочих процессов / В. Н. Луканин [и др.] ; под ред. В. Н. Луканина. – Кн. 1. – М. : Высшая школа, 2005. – 479 с.

24. Иванов, Н. И. Инженерная акустика: теория и практика борьбы с шумом / Иванов Н. И. – М.: Логос, 2010. – 422 с.

25. Радоуцкий, В. Ю. Улучшение условий труда работников шумных производств агропромышленного комплекса на примере ОАО «Белагромаш-сервис»: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.26.01 / В. Ю. Радоуцкий. – СПб., 2003. – 146 с.

26. Григорьев, М. А. Обеспечение надежности двигателей / М. А. Григорьев, В. А. Долецкий. – М. : Издательство стандартов, 1978. – 324 с.

27. Заренбин, В. Г. Исследование режимов приработки автомобильных двигателей при капитальном ремонте / В. Г. Заренбин, А. Х. Касумов. – М.: Транспорт, 1983. – 78 с.

28. Сорокин, Г. М. Оценка совместимости материалов пар трения электрическим методом / Г. М. Сорокин, Б. И. Ковальский // Трение и износ. – 1986. – Том 7, № 2. – С. 234–239.

29. Экспериментальная оценка наследственной и диссипативной характеристик приработки / Т. А. Точигина [и др.] // Трение и износ. – 1986. – Том 7, № 2. – С. 206–213.

30. Кузнецов, Ю. Д. Экспериментальная база ООО ГСКБ «Трансдизель» / Ю. Д. Кузнецов, В. В. Щеголев // Двигателестроение. – 2008. – № 2. – С. 17–19.

31. Янкевич, Н. С. Применение системного подхода при анализе надежности двигателей внутреннего сгорания / Н. С. Янкевич, А. С. Климук, Н. О. Берестнева. – Минск : Ин-т надежн. машин НАН Беларуси, 1999. – 97 с.

32. Шаронов, Г. П. Применение присадок к маслам для ускорения приработки двигателей / Г. П. Шаронов. – М.-Л. : Химия, 1965. – 224 с.

33. Гурвич, И. Б. Испытания двигателей на долговечность / И. Б. Гурвич. – Горький : ГГУ им. Н. И. Лобачевского, 1978. – 78 с.

34. Дюмин, И. Е. Повышение эффективности автомобильных двигателей / И. Е. Дюмин. – М. : Транспорт, 1987. – 176 с.

35. Костецкий, Б. И. Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. – Киев : Техника, 1970. – 396 с.

36. Савченко, Н. З. Теоретические и экспериментальные основы процесса приработки сопряженных деталей двигателей внутреннего сгорания : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / Н. З. Савченко. – Киев, Укр. с.-х. акад., 1971. – 457 л.

37. Абдрашитов, Р. Т. О физике процесса приработки и совершенствовании алгоритма обкатки ДВС / Р. Т. Абдрашитов, А. И. Шевченко,

Н. Н. Якунин // Использование микропроцессоров при автоматизации послеремонтной обкатки автомобильных двигателей / Оренбург. центр науч.-техн. информации. – Оренбург, 1985. – С. 23–31.

38. Тимохин, С. В. Комплект оборудования для обкатки и испытания двигателей / С. В. Тимохин, А. Н. Морунков, Н. А. Мухатаев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 2. – С. 42–44.

39. Хитрюк, В. А. Ремонт автотракторных двигателей / В. А. Хитрюк, Л. Ф. Баранов. – Минск : Ураджай, 1987. – 96 с.

40. Николаенко, А. В. Методика выбора оптимальных режимов автоматизированной обкатки двигателей внутреннего сгорания / А. В. Николаенко, М. З. Варшавский // Автоматический контроль и управление технологическими процессами мобильных агрегатов сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. Ленингр. с.-х. ин-та, 1986. – С. 42–48.

41. Дворовенко, А. Г. К выбору ускоренных режимов приработки двигателей цилиндро-поршневой группы дизелей / А. Г. Дворовенко, В. А. Логвин, А. П. Кудряш. – Харьков : Ин-т пробл. маш. АН УССР, 1987. – 25 с.

42. Брук, М. А. Работа дизеля в нестационарных условиях / М. А. Брук, А. С. Виксман, Г. Х. Левин. – Л. : Машиностроение, 1981. – 208 с.

43. Шадрина, Н. И. Автоматизация обкатки двигателей в условиях ремонтного производства / Н. И. Шадрина, А. Н. Кириллов, И. Б. Александров // Диагностика повышения эффективности, экономичности и надежности двигателей : сб. науч. тр. Ленинградского с.-х. ин-та. – Л., 1985. – С. 38–40.

44. Гаенко, Л. М. Приработка и испытание автомобильных двигателей / Л. М. Гаенко. – М.: Транспорт, 1966. – 110 с.

45. Стрельцов, В. В. Ускорение приработки деталей во время стендовой обкатки отремонтированных двигателей внутреннего сгорания (на примере ЗМЗ-53 и ЗИЛ-130) : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / В. В. Стрельцов ; Моск. гос. агроинж. ун-т. – М., 1993. – 41 с.

46. Симсон, А.Э. Двигатели внутреннего сгорания / А.Э. Симсон. – М. : Транспорт, 1980. – 384 с.

47. Синельников, А. Ф. Автомобильные масла : краткий справочник / А. Ф. Синельников, В. И. Балабанов. – М. : За рулем, 2005. – 176 с.

48. Вешкельский, С. Л. Техническая эксплуатация двигателей внутреннего сгорания / С. Л. Вешкельский, Б. С. Лукьянченко. – Л. : Машиностроение, 1986. – 136 с.

49. Двигатели ЯМЗ-236М2, ЯМЗ-236Д, ЯМЗ-238М2, ЯМЗ-238АМ2, ЯМЗ-238ВМ. Обкатка, регулировка и приемо-сдаточные испытания. Инструкция 236М2-39021112-ДИ. – Ярославль, 1988. – 34 с.

50. Венцель, С. В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания / С. В. Венцель. – М. : Химия, 1979. – 240 с.

51. Петриченко, Р. М. Метод оценки мощности трения в поршневой группе ДВС / Р.М. Петриченко // Двигателестроение. – 1979. – № 7. – С. 24—25.

52. Баранов, А. Ф. Техническое обслуживание и ремонт машин / А. Ф. Баранов. – Ростов н/Д : Феникс, 2001. – 416 с.

53. Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования : в 2 ч. / А. В. Дубровный [и др.] ; под общ. ред. В. И. Иваненко. – Киев : Наукова думка, 1981. – Ч. 2. – 940 с.

54. Вохидов, А. С. Методы повышения износостойкости и ресурсосбережение за счет применения эпиламирующих составов / А. С. Вохидов, М. В. Мальков, В. Ю. Долганов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 1. – С. 9–12.

55. Лялякин, В. П. Нанодисперсные металлосодержащие добавки к моторным маслам / В. П. Лялякин, Н. Н. Литовченко // Машино-технологическая станция. – 2004. – №1. – С. 42–44.

56. Колчин, А. В. Новые обкаточно-тормозные стенды для двигателей внутреннего сгорания / А. В. Колчин, Л. А. Буренко // Машино-технологическая станция. – 2004. – № 1. – С. 53–54.

57. Структура и свойства износостойких покрытий / П. А. Витязь [и др.]; под ред. П. А. Витязя. – Минск : Белор. гос. аграр. техн. ун-т, 2006. – 327 с.

58. Установка для обкатки и испытания двигателей внутреннего сгорания : а. с. 1032343 СССР, МКИ4 G 01 M 15/00 / В. Г. Андруш, В. К. Довбня, Ю. В. Дробышев ; Белор. ин-т механ. сел. хоз-ва – № 3406687 ; заявл. 05.03.82 ; опубл. 30. 07.83 // Открытия. Изобрет. – 1983. – № 28. – С. 171.

59. Устройство для обкатки и испытания двигателей внутреннего сгорания : пат. 10668 Респ. Беларусь, МПК (2006) G 01 M 15/04, F 02 M 27/00 / В. Г. Андруш, Н. А. Равинский, П. А. Равинский ; заявитель Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – № а 20060660 ; заявл. 04.07.06 ; опубл. 30.06.08. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 3. – С. 149.

60. Двигатели ЯМЗ-236М, ЯМЗ-238М : инструкция по эксплуатации. – М. : Горизонт-Консалтинг Лтд, 2006. – 184 с.

61. Нигаматов, М. Х. Ускоренная обкатка двигателей после ремонта / М. Х. Нигаматов. – М. : Колос, 1984. – 80 с.

62. Тюрин, А. Н. Суперфинишная обработка высокоточных деталей двигателей внутреннего сгорания / А. Н. Тюрин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 2. – С. 24–25.

63. Триботехнология формирования поверхностей / И. Х. Чеповецкий [и др.] ; под ред. И. Х. Чеповецкого. – Киев : Наукова думка, 1989. – 232 с.

64. РТМ 10.16.0001.002-87. Руководящий технический материал. Обкатка и испытание тракторных и комбайновых дизелей при капитальном ремонте – введ. с 01.09.89. – М. : Госуд. всесоюз. науч.-исслед. технол. ин-т, 1989. – 80 с.

65. Носихин, П. И. Повышение качества и ускорение обкатки капитально отремонтированных дизелей в условиях ремонтных предприятий агропрома : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.08 / П. И. Носихин ; Моск. ин-т инж. с.-х. пр-ва. – М., 1990. – 16 с.

66. Новиков, В. И. Результаты исследований по применению композиции АРВК при обкатке после ремонта тракторных агрегатов / В. И. Новиков, В. И. Белый // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 4. – С. 37–39.

67. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Камбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.

68. Батхан, Л. З. О динамике холодной обкатки дизелей Д-240 / Л. З. Батхан // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межведомственный тематический сборник. – Минск : Ураджай, 1986. – Вып. 28. – С. 108–113.

69. Стенд для обкатки и диагностики двигателей внутреннего сгорания : пат. № 2118680 Рос. Федерация, МПК6 F02 B79/00, G01 M 15/00 / В. А. Бондаренко, Е. В. Бондаренко, К. Ф. Дурнев, К. Н. Карманов, В. В. Цыбакин, И. А. Чикризлов ; заявитель Оренбург. гос. ун-т. – № 96109098/06 ; заявл. 30.04.96 ; опубл. 10.09.98 // Официальный бюл. / Рос. аген. по пат. и тов. знакам. – 1998. – № 25. – С. 168.

70. Погорельый, И. П. Обкатка и испытание тракторных и автомобильных двигателей / И. П. Погорельый. – М. : Колос, 1973. – 208 с.

71. Белобоков, Б. Г. Снижение механических потерь двухцилиндрового дизеля / Б. Г. Белобоков, А. Н. Гоц, В. В. Эфрос // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2000. – № 3. – С. 25–27.

72. Денисов, А. С. Надежность сопряжений со смазкой в зависимости от нагрузочного и скоростного режимов / А. С. Денисов, В. Е. Неустроев // Сб. науч. тр. / Саратовский с.-х. ин-т. – Саратов, 1977. – Вып. 91 : Повышение долговечности сельскохозяйственных машин при ремонте. – С. 31–41.

73. Коровянский, И. А. Контроль качества приработки при обкатке двигателей в заводских условиях / И. А. Коровянский, А. А. Стаценко // Сб. науч. тр. / Саратовский с.-х. ин-т. – Саратов, 1977. – Вып. 91 : Повышение долговечности сельскохозяйственных машин при ремонте. – С. 59–66.

74. Трубилов, А. К. Безразборная оценка послеремонтного ресурса автотракторных дизелей по комплексному критерию качества в период 60-часовой стендовой обкатки : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / А. К. Трубилов. – Минск, 1999. – 206 л.

75. Новорождин, Д. Д. Разработка способа определения остаточного ресурса тракторных двигателей по состоянию моторного масла : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 05.20.03 / Д. Д. Новорождин ; Кишин. с.-х. ин-т. – Кишинев, 1983. – 21 с.

76. Подколзин, С. В. Исследование процесса накопления примесей в смазочном масле двигателей трактора «Кировец» в связи с их изнашиванием / С. В. Подколзин, В. К. Бобров // Диагностика, повышение эффективности, экономичности и надежности двигателей : сб. науч. тр. / Ленингр. с.-х. ин-т. – Л., 1985. – С. 37–48.

77. Гребенец, Н. В. Методика отбора проб масла в двигателях внутреннего сгорания для контроля износа / Н. В. Гребенец // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2008. – № 5. – С. 35–36.

78. Андруш, В. Г. Обоснование режимов обкатки двигателей после ремонта / В. Г. Андруш // Агропанорама. – 2008. – № 2. – С. 13–16.

79. Акустические и электрические методы в триботехнике / А. И. Свириденко [и др.] ; под ред. В. А. Белого. – Минск : Наука и техника, 1987. – 289 с.

80. Устройство для обкатки двигателя внутреннего сгорания : пат. на пол. модель 5822 Респ. Беларусь, МПК (2009) G 01 M 15/00 / В. Г. Андруш, Л. А. Хвошинская, Д. В. Карпович ; заявитель Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – № и 20090455 ; заявл. 03.06.09 ; опубл. 30.12.09. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 6. – С. 214.

81. Гурвич, И. Б. О механических потерях в автомобильных двигателях / И. Б. Гурвич, А. П. Егорова, Ю. М. Панов // Двигателестроение. – 1980. – № 3. – С. 54–55.

82. Бурганская, Л. И. Исследование мощности механических потерь в зависимости от времени, температуры масла и скорости изменения режимов обкатки / Л. И. Бурганская, Л. А. Хвоцинская, В. Г. Андруш, А. Н. Смаль // Агропанорама. – 2006. – № 1. – С. 27–31.

83. Хрущов, М. М. Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф / М. М. Хрущов. – М.: Изд-во АН СССР, 1946. – 160 с.

84. Кольченко, В. И. Исследование механических потерь тракторных дизелей / В. И. Кольченко // Исследование и испытание тракторов, их узлов и агрегатов : труды НАТИ. – М., 1986. – С. 48–59.

85. Мухин, Е. М. Обкатка V-образных автомобильных двигателей при капитальном ремонте / Е. М. Мухин, И. И. Столяров. – М. : Транспорт, 1974. – 104 с.

86. Тракторные дизели : справочник / Б. А. Взоров [и др.] ; под ред. Б. А. Взорова. – М. : Машиностроение, 1981. – 535 с.

87. Евенко, В. И. Анализ несоответствия индикаторного КПД поршневого двигателя законам термодинамики / В. И. Евенко // Двигателестроение. – 2004. – №2. – С. 10–12.

88. Тончев, Г. Исследование на качество на ремонтируемые тракторные двигатели в процессе на производственном им прогонване / Г. Тончев, Л. Станев // Научн. тр. Висше техн. училище. Русе, 1983. – С. 151–161.

89. Дробышев, Ю. В. Перспективы развития конструкций обкаточных испытательных стендов для ремонтных предприятий / Ю. В. Дробышев. – Минск : БелНИИТИ, 1983, – 47 с. – (Обзорная информация / Белорус. науч.-исслед. ин-т науч.-техн. информ.).

90. Короткевич, А. В. Основы испытаний сельскохозяйственной техники / А. В. Короткевич. – Минск : Изд-во БАТУ, 1999. – 444 с.

91. Жданко, Д. А. Теоретическое обоснование параметров гидравлического тормозного устройства обкаточно-тормозного стенда / Д. А. Жданко // Агропанорама. – 2009. – №3. – С. 38–42.

92. Испытательный стенд с динамометром постоянного тока SDS // Mezservis spol. s. r.o. [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа : <http://www.mezservis.cz./index.net?oid=175>. – Дата доступа : 03.05.2008.

93. Северный, А. Э. Модернизация сельскохозяйственных машин, находящихся в эксплуатации. Состояние, концепция и рекомендации / А. Э. Северный, Л. М. Пильщиков, В. И. Федан ; под рук. В.И. Чернованова. – М.: Всерос. науч.-исслед. технол. ин-т, 2000. – 117 с.

94. Автоматические регуляторы скорости вращения мощностью от 0,4 до 450 кВт : каталог Индустриал системс. – Минск : Системы и компоненты, 2014. – 11 с.

95. Андруш, В. Г. Ресурсосбережение и повышение экологической безопасности при ремонте двигателей внутреннего сгорания / В. Г. Андруш, А. В. Стокин // Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных ресурсосберегающих технологий в АПК : материалы МНПК в 2 ч. – Рязань : ФГБОУ ВО РГАТУ, 2017. – Ч. 2. – С. 7–9.

96. Автоматическое устройство для оценки приработанности двигателя внутреннего сгорания : а. с. 1796957 СССР, МКИ5 G 01 M 15/00 / Л. З. Батхан, А. З. Батхан, В. А. Бородин, А. В. Рожанский ; Минск. моторн. з-д и Центр. науч.-исслед. ин-т мех. и эл. с.-х. – № 4707653 ; заявл. 19.06.89 ; опубл. 23.02.93 // Открытия. Изобрет. – 1993. – № 7. – С. 31.

97. Прищепов, М. А. Стеновая обкатка автотракторных дизелей с заданием ее режимов по мощности механических потерь / М. А. Прищепов, В. Г. Андруш // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2012. – № 2. С. 105–110.

98. Railey, M. Rontgenbilder vom Motor / M. Railey // AMZ : Auto, Mot., Zubbehör. – 1996. – № 12. – P. 40.

99. Ren, Z. A low cost computer controlled IC engine test facility / Z. Ren, T. Campbell, Y. B. Yang // Meas. + Contr. – 1998. № 4. – P. 105–109.

100. Григорьев, В. Г. Технические средства автоматизации дизелей / В. Г. Григорьев, В. В. Колешонок. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1989. – 36 с. – (Обзорная информация / Центр. науч.-исслед. ин-т техн.-экон. информ. тяж. машиностр-я).

101. Стенд для обкатки двигателей ЯМЗ-236,238, КаМАЗ-740, ЗИЛ-130, 375, 508.10, ЗМЗ-53, ГАЗ-52, Д-245.12 – // ООО «ТехАвто» [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа : <http://www.teh-avto.ru/production/521.html/> – Дата доступа : 09.05.2008.

102. Kock, K. H. Computer aided tuning of digital controllers of the automation of engine test rigs / K. H. Kock // Predikt. and Simul. Serv. Cond. Conf., London, 22–23 May 1985. – London, 1985. – P. 81–90.

103. Герасимович, Л. С. Системный анализ агроэнергетики / Л. С. Герасимович. – Минск : Технопринт, 2004. – 126 с.

104. Андруш, В. Г. Сокращение длительности обкатки двигателей внутреннего сгорания после капитального ремонта / В. Г. Андруш //

Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 3–4 июня 1997 г. / Белор. гос. аграр. техн. ун-т ; под ред. Г. И. Януковича. – Минск, 1997. – С. 92–93.

105. Ивашко, В. С. Разработка устройства управления стендом для обкатки и испытания двигателей внутреннего сгорания / В. С. Ивашко, В. Г. Андруш // Инженерный вестник. – 2005. – №1. – С. 34–36.

106. Стенд для обкатки и испытания двигателя внутреннего сгорания : пат. 7067 Респ. Беларусь, МПК 7 G 01 M 15/00 / В. Г. Андруш ; заявитель Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – № а 20020276 ; заявл. 04.04.02 ; опубл. 30.06.05. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 2. – С. 226.

107. Чудук, С. А. Обкатка ДВС : Совершенствование процесса с использованием микропроцессорной техники / С. А. Чудук // Современные технологии в ремонтно-обслуживающем и машиностроительном производстве АПК : материалы МНТК, Минск, 6–7 октября 1999 г. / БГАТУ; редкол.: В. С. Ивашко [и др.]. – Минск, 2000. – С. 42–44.

108. Дижур, М. М. Моделирование и расчетные исследования процесса прокрутки двигателя электростартером / М. М. Дижур, Б. Р. Ибрагимов // Исследование, конструирование и расчет тепловых двигателей внутреннего сгорания : сб. науч. тр. НАМИ. – М., 1986. – С. 50–58.

109. Васильев-Южин, Р. М. Численное моделирование эксплуатационных характеристик дизелей / Р. М. Васильев-Южин // Двигателестроение. – 1980. – № 4. – С. 34–36.

110. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний : ГОСТ 18509–88 (СТ СЭВ 2560-80). – Введ. 06.08.88. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 67 с.

111. Васильев-Южин, Р. М. Исследование совместной работы дизеля и агрегатов воздухообеспечения при изменении внешних условий / Р. М. Васильев - Южин // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков : Высшая школа, 1977. – Вып. 25. – С. 42–49.

112. Орлов, П. И. Смазка легких двигателей / П. И. Орлов ; под ред. проф. Н. Р. Бриллинга. – Л.: ОНТИ, 1937. – 462 с.

113. Энглиш, К. Поршневые кольца / К. Энглиш. – М. : Машгиз, 1962. – Т. 1. – 583 с.

114. Глаголев, А. Ф. Экспериментальное исследование влияния эксплуатационных факторов на величину составляющих механических потерь в четырехтактных дизелях / А. Ф. Глаголев // Двигателестроение. – 1979. – № 12. – С. 42–44.

115. Меден, А. И. Исследование механических потерь в дизелях типа Д-49 : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / А. И. Меден ; МВТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 1973. – 12 с.

116. Масла и составы против износа автомобилей / В. М. Школьников [и др.]. М. : Химия, 1988, – 96 с.

117. Бохан, Н. И. Планирование экспериментов в исследованиях по механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства / Н. И. Бохан, А. М. Дмитриев, И. С. Нагорский. – Горки : Белор. с.-х. акад., 1986. – 80 с.

118. Дрейпер, Н. Прикладной регрессионный анализ : в 2 кн. / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М. : Финансы и статистика, 1986. – Кн. 1. – 366 с.

119. Двигатели ЯМЗ-236, ЯМЗ-238. Устройство, эксплуатация, ремонт, обслуживание. – Днепропетровск: Днипро, 1996. – 232 с.

120. РК РБ 000 17590. 444-95. Двигатели ЯМЗ-236, 238, 240 и их модификации. Руководство по капитальному ремонту. Часть 2 ; Введ. с 01.06.96. – Минск : Бел. науч.-исслед. ин-т «Транстехника», 1995. – 277 л.

121. Андруш, В. Г. Математическая модель контроля мощности механических потерь обкатываемых двигателей / В. Г. Андруш // Агрощанорама. – 2007. – № 1. – С. 31–35.

122. Елисеева, И. И. Общая теория статистики / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 480 с.

123. Типовая методика оценки качества приработки тракторных двигателей на моторостроительных и мотороремонтных заводах / В. С. Архипов [и др.] ; под науч. рук. П. М. Кривенко. – М. : Гос. всесоюз. науч.-иссл. технол. ин-т, 1974. – 17 с.

124. Cantore, G. Mehrdimensionale Stromungs- und Verbrennungsmodelle // G. Cantore, G.M. Bianchi, G. Guerrini, F. Papetti // Werkstatt und Betr. – 1998. – № 4. – P. 274–279.

125. Андруш, В. Г. Оптимизация режимов обкатки двигателей после капитального ремонта / В. Г. Андруш, Л. А. Хвошинская // Математические методы в технике и технологиях : сб. тр. XXI междунар. науч. конф., Саратов, 27–30 мая 2008 г. В 10 т. / Сарат. гос. техн. ун-т ; под общ. ред. В. С. Балакирева. – Саратов, 2008. – Т. 6. – С. 45–47.

126. Двигатели ЯМЗ-236, ЯМЗ-238, ЯМЗ-238А, ЯМЗ-238В. Обкатка и испытания: инструкция. – Ярославль, 1978. – 29 с.

127. РК 200–РСФСР–2/1–2018–88. Двигатели ЯМЗ мод.236, 238, 240 и их модификации. Руководство по капитальному ремонту 236.00.000 РК Ч. II. Сборка, регулировка и испытания. – М. : Госуд. всесоюз. науч.-иссл. технол. ин-т, 1989. – 264 с.

128. Чичинадзе, А. В. Трение, износ и смазка / А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с.

129. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний: ГОСТ 14846–81. – Введ. 24.06.81. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 38 с. (переизд. март 1991 г. с измен. ИУС РБ № 3 2003 г.).

130. Ивашутин, В. М. Обкатка силовых установок после заводского ремонта и ее значение для повышения износостойкости деталей цилиндра-поршневой группы / В. М. Ивашутин, В. Д. Сонов, Л. А. Тимофеева // Инженерия поверхности и реновация изделий : материалы 3-й Междунар. конф. – Киев : АТМ Украины, 2003. – С. 99–101.

131. Карташевич, А. Н. Интенсивная очистка жидкостей и газов в технических системах / А. Н. Карташевич, Е. И. Мажугин. – Минск : Красико-принт, 2002. – 290 с.

132. Андруш, В. Г. Выбор рационального режима обкатки двигателя после ремонта / В. Г. Андруш // Агропанорама. – 2008. – № 5. – С. 40–44.

133. Устройство для управления регулируемым источником реактивной мощности : пат. 3341 Респ. Беларусь, МПК 6 Н 02J 3/16, G 05F 1/70 / В. П. Счастный, В. Г. Андруш, А. И. Жуковский ; заявитель Белор. гос. аграр. техн. ун-т. – № 970347 ; заявл. 30.06.97 ; опубл. 30.06.2000. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2000. – № 2. – С. 146.

134. Мартыненко, И. И. Проектирование систем автоматики / И. И. Мартыненко, В. Ф. Лысенко. – М. : Агропромиздат, 1990. – 243 с.

135. Практическое пособие по выбору и разработке энергосберегающих проектов / Костюченко П. А [и др.] ; под общ. ред. О. Л. Данилова, П. А. Костюченко. – М. : Технопромстрой, – 2006. – 668 с.

136. Система организации внедрения завершённых НИР и ОКР в АПК, методы оценки эффективности НИР и ОКР на стадии их планирования и завершения. – Минск : 1999. – 82 с.

137. Ширшова, В. В. Оценка эффективности замены оборудования при модернизации производства / В. В. Ширшова, А. В. Королёв // Экономика. Финансы. Управление. – 2005. – № 5. – С. 32–37.

138. Турчак, Л. И. Основы численных методов / Л. И. Турчак, П. В. Плотников // М. : Физматлит, 2002. – 374 с.

139. Коваленко, Н. А. Техническая эксплуатация автомобилей / Н. А. Коваленко, В. П. Лобах, Н. В. Вепринцев. – Минск : Новое знание, 2008. – 352 с.

140. Способ определения составляющих суммарного момента сопротивления проворачиванию коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания : а. с. 1725082 СССР, МКИ5 G 01 M 15/00 / Б. А. Григорьев ; Вост.-Сиб. ф-л Гос. науч.-исслед. ин-та автом. транспорта. – № 4806932 ; заявл. 19.01.90 ; опубл. 07.04.92 // Открытия. Изобрет. – 1992. – № 13. – С. 157.

141. Способ эквивалентно-циклических испытаний поршневых ДВС : пат. 2140064 РФ, МПК6 G 01 M 15/00 / А. С. Коровин, Н. И. Максимов ; заявитель Коровин А. С., Максимов Н. И. – № 97113440 ; заявл. 31.07.97 ; опубл. 20. 10.99 // Официальный бюл. / Рос. аген. по пат. и тов. знакам. – 1999. – № 29.

142. Зуев, В. П. Ультразвуковая обработка дизельных топлив как средство борьбы с нагарообразованием / В. П. Зуев [и др.]. // Надежность и диагностика двигателей сельскохозяйственных тракторов в эксплуатации. – Л. : ЛСХИ, 1981. – Т. 411.

143. Пашенко, В. Ультразвук облегчает запуск / В. Пашенко, Е. Лукин, А. Колосов. – Сельский механизатор. – № 3. – 2005.

144. Надежность и ремонт машин / В. В. Курчаткин [и др.] ; под ред. В. В. Курчаткина. – М. : Колос, 2000. – 776 с.

145. Суранов, Г. И. Повышение долговечности двигателей транспортных машин созданием избирательного переноса при трении / Г. И. Суранов, Ю. А. Шахтаров, В. А. Прищепов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2007. – № 4. – С. 22–26.

146. Повышение качества приработки дизелей в процессе обкатки с помощью присадок к топливу / Ю. А. Микутенок [и др.]. // Двигателестроение. – 2000. – № 4. – С. 14–17.

147. Синяя, Н. В. Новый технологический процесс ремонта гильз цилиндров / Н. В. Синяя // Техника и оборудование для села. – 2008. – № 1. – С. 34–35.

148. Абдрашитов, Р. Т. Особенности оптимизации обкатки ДВС / Р. Т. Абдрашитов, К. Ф. Дурнев // Использование микропроцессоров при автоматизации послеремонтной обкатки автомобильных двигателей / Оренбург. центр науч.-техн. информации. – Оренбург, 1985. – С. 3–11.

149. Ledus, R. Etude experementale des relations entre frottement et usure dans les moteurs a combustion interne / R. Ledus, J. Vaerman, R. De Craecker, G. De Brille // Ann. Inst. Belge petrole. – 1985. – № 4. – P. 9–15.

150. Никифоров, А. Д. Высокие технологии размерной обработки в машиностроении / А. Д. Никифоров, А. Н. Ковшов, Ю. Ф. Назаров. – М. : Высшая школа, 2007. – 327 с.

151. Новиков, В. И. Результаты исследований по применению композиции АРВК при обкатке после ремонта тракторных агрегатов / В. И. Новиков, В. И. Белый // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 4. – С. 37–39.

152. Тимошенко, В. Я. Повышение эффективности технического обслуживания тракторов / В. Я. Тимошенко, Д. А. Жданко и др. // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК. – Минск : БГАТУ, 2018. – С. 146–151.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1

Режим обкатки двигателей Д-245Л на производстве
ПО «ММЗ» (Минский моторный завод)

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, Н·м	Продолжительность обкатки, мин
Холодная	1200	0	10
Всего			10
На холостом ходу	1200	0	5
- -	1400	0	5
Всего			10
Горячая под нагрузкой	1400	22	5
- -	1600	60	5
- -	1800	180	5
- -	2000	300	5
- -	2100	360	5
- -	2200	420	5
- -	2200	№	2
Всего			27
ИТОГО:			47

Таблица А2

Режим обкатки двигателей Д-245Л после ремонта

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, Н·м	Продолжительность обкатки, мин
Холодная	600-650	0	10
- -	750-800	0	10
- -	900-950	0	10
Всего			30
На холостом ходу	1200	0	10
- -	1400	0	5
Всего			15
Горячая под нагрузкой	2200	50	5
- -	2200	100	5
- -	2200	160	5
- -	2200	210	5
- -	2200	250	5
	2200	300	5
Всего			30
ИТОГО:			75

Таблица А3

Режим обкатки двигателей Д-260.1 на производстве
ПО «ММЗ» (Минский моторный завод)

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, Н·м	Продолжительность обкатки, мин
Холодная	800	0	8
- -	1000	0	7
- -	1200	0	5
Всего			20
На холостом ходу	1200	0	10
- -	1400	0	5
Всего			15
Горячая под нагрузкой	1600	70	5
- -	1600	140	4
- -	1800	280	6
- -	2000	420	5
- -	2100	Ne	5
Всего			25
ИТОГО:			60

Таблица А4

Режим обкатки двигателей Д-260.1 после ремонта

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, Н·м	Продолжительность обкатки, мин
Холодная	1200	0	15
Всего			15
На холостом ходу	1200	0	10
- -	1400	0	5
Всего			15
Горячая под нагрузкой	1400	22	5
- -	2100	70	10
- -	2100	140	10
- -	2100	210	10
- -	2100	280	10
- -	2100	350	10
- -	2100	420	10
Всего			60
ИТОГО:			90

Таблица А5

Режим обкатки двигателей ЯМЗ-236 (ЯМЗ-236НК) на производстве
ОАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод)

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, Н·м	Продолжительность обкатки, мин
Холодная	800	0	4
- -	1200	0	2
- -	1400	0	4
Всего			10
На холостом ходу	1300	0	5
Горячая под нагрузкой	1400	22	5
То же	1500	51,5	5
- -	1600	73,6	5
- -	1700	95,6	5
- -	1800	117,7	5
Всего			25
ИТОГО:			40

Таблица А6

Режим обкатки двигателей ЯМЗ-238 (ЯМЗ-7511 Евро-2)
на производстве ОАО «Автодизель» (Ярославский моторный завод)

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт	Продолжительность обкатки, мин
		ЯМЗ-238	
Холодная	800	0	4
- -	1200	0	2
- -	1400	0	4
Всего			10
На холостом ходу	1500	0	5
Горячая под нагрузкой	1600	51,5	5
То же	1700	103	5
- -	1800	154,5	5
- -	1900	205,9	5
- -	1900	235,4	5
Всего			25
ИТОГО:			40

Таблица А7

Режим обкатки двигателей ЯМЗ-236М, ЯМЗ-238М после ремонта

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, кВт		Продолжительность обкатки, мин
		ЯМЗ-236	ЯМЗ-238	
Холодная	800	0	0	20
- -	1200	0	0	20
- -	1400	0	0	10
Всего				50
На холостом ходу	1500	0	0	10
Всего				10
Горячая под нагрузкой	1600	22	30	10
То же	1700	44	60	10
- -	1800	66	88	5
- -	1900	88	110	5
- -	2000	102	138	5
Всего				35
ИТОГО:				95

Таблица А8

Режим обкатки двигателей Д-280 на производстве
ПО «ММЗ» (Минский моторный завод)

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, Н·м	Продолжительность обкатки, мин
Холодная	1200	0	10
Всего			10
На холостом ходу	1400	0	10
- -	1600	0	10
Всего			20
Горячая под нагрузкой	1400	211	10
- -	1400	427	10
- -	1400	637	10
- -	1400	853	5
- -	1600	848	5
- -	1600	992	5
- -	1800	992	5
	1800	1139	5
	1900	1139	5
	1900	1279	5
	2000	1279	5
	2000	1349	5
	2100	1348	5
	2100	1450	5
Всего			85
ИТОГО:			115

Электрическая принципиальная схема и описание работы системы управления обкаточным стендом с АВК

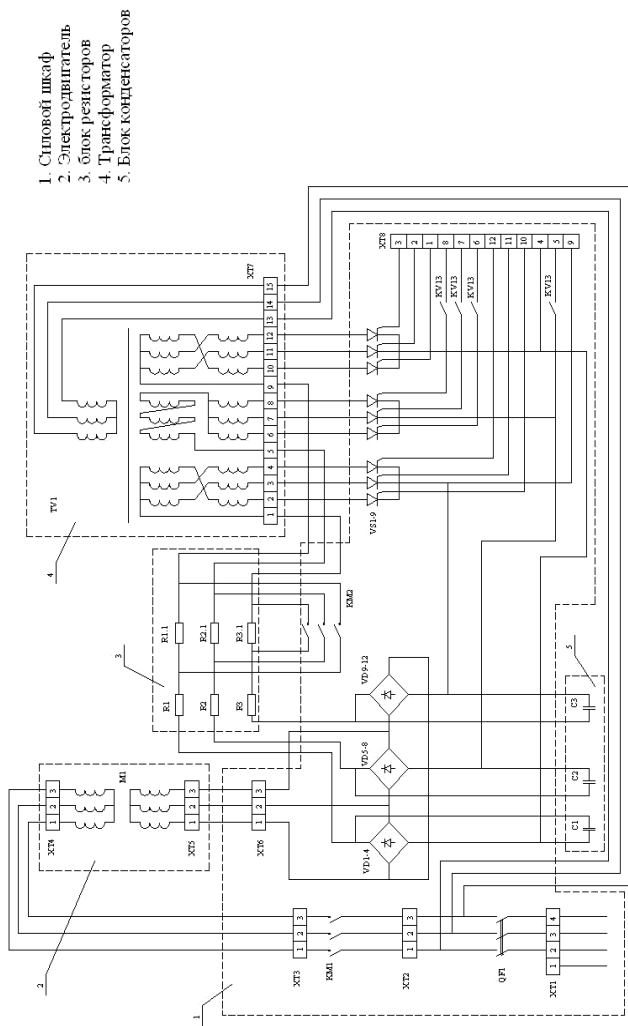


Рисунок Б.1 – Электрическая принципиальная схема управления силовой частью обкаточного стенда с АВК

Принципиальная электрическая схема системы импульсно-фазного управления станком с АВК (рис. Б.2 и Б.3) включает:

- формирователь трехфазный;
- фазовременной преобразователь;
- формирователь выходных импульсов;
- сравнивающее устройство;
- стабилизаторы напряжения.

Формирователь трехфазный (рис. Б.2) предназначен для получения синхроимпульсов соответствующих фаз. Он состоит из трех одинаковых плат. Напряжение сети поступает через предохранители 7FU1 и 7FU2, ограничивающие резисторы 7R3 и 7R4 на базу составного транзистора 7VT1 – 7VT2 и диоды 7VD4 и 7VD5 на его коллектор. При поступлении положительной полуволны транзистор открывается до насыщения, а при отрицательной и нулевом напряжении он закрыт. Для защиты транзистора от пробоя служит диод 7VD6, включенный в прямом направлении. С коллектора транзистора через ограничительный резистор 7R7 напряжение подается на базу транзистора 7VT5, в цепи коллектора которого стоит ограничительный резистор 7R8 и светоизлучающий диод оптрона 7А.

Питание обоих транзисторных каскадов осуществляется от однопериодного выпрямителя, собранного на ограничительных резисторах 7R1 и 7R2, конденсаторе 7C5, выпрямительных диодах 7VD2 и 7VD3, стабилитроне 7VD1 и сглаживающем фильтре – конденсаторы 7C1 и 7C2. Оptron служит для гальванической развязки напряжения сети от остальной части схемы. Сигнал с оптрона поступает на базу составного транзистора 7VT3–7VT4. Режим для оптрона и транзистора на базе задается резистором 7R10. С нагрузки коллектора составного транзистора напряжение поступает на вход микросхемы 7Д (триггер Шмита). На выходе получаем логический сигнал – ТТЛ со скважностью 2.

Фазовременной преобразователь предназначен для получения импульсов, сдвинутых по времени относительно импульсов синхронизации пропорционально фазе. Управление сдвигом осуществляется подачей напряжения (через контакт 8В).

На операционном усилителе (микросхема 8А1) собран генератор пилообразного напряжения, управляемый прямоугольными импульсами, снимаемыми с коллектора транзистора 8VT. Резисторы 8R10,

8R11, 8R12 и конденсатор 8C4 задают параметры пилообразного напряжения. Резисторы 8R8 и 8R9 создают среднюю точку для инвертирующего входа. Управляющие прямоугольные импульсы определенной длительности формируются микросхемой 8A2 (ждуший мультивибратор), в свою очередь, управляемой ждущим мультивибратором (микросхема 8A1). Этот мультивибратор срабатывает от переднего или заднего фронта синхроимпульса в зависимости от положения переключателя 8SA, а продолжительность его может регулироваться резистором 8R1. Резистор 8R2 и конденсатор 8C7 определяют диапазон регулирования длительности импульса. Это необходимо для сдвига пилообразного напряжения, так как последующий ждущий мультивибратор запускается задним фронтом предыдущего.

Пилообразное напряжение (контакт 6 микросхемы 8A1) при соответствующей коммутации поступает на компаратор, собранный на микросхеме 8A2. На инвертирующий вход компаратора подается управляющее напряжение, а на выходе его получаем импульс, широта которого зависит от управляющего напряжения. Дальше он преобразуется в сигнал с помощью формирователя на элементах 8R16, 8VD2, 8R15, 8VD3 и триггера Шмитта 8D3.

Формирователь выходных импульсов (рис. Б.3) предназначен для получения управляющих импульсов гальванически развязанных от сети и имеющих дополнительный сдвиг по фазе и регулировку по длительности.

Входной сигнал поступает на первый или второй ждущий мультивибратор (микросхема 9D1 и 9D2) в зависимости от положения переключателя 9SA3. Первый из них используется для дополнительного сдвига, а второй для формирования выходного импульса. Переключатели 9SA1 и 9SA2, а также резисторы и конденсаторы в цепи задают диапазон регулирования импульсов. Выходной импульс с контакта 5 микросхемы 9D2 через ограничительный резистор 9R9 поступает на светоизлучающий диод оптрона 9А, служащего в качестве гальванической развязки. Выходной сигнал с оптрона формируется и усиливается аналогичным способом, как в трехфазном формирователе, и далее через эмиттерный повторитель (транзистор 9VT4) поступает на выход. Питание выходных каскадов осуществляется от отдельных обмоток трансформатора.

Сравнивающее устройство предназначено для получения управляющего напряжения при работе с обратной связью. Оно представляет собой компаратор (микросхема 10А), на входы которого подаются импульсы с эмиттерных повторителей (транзисторы 10VT1 и 10VT2). На базы этих транзисторов поступают импульсы для сравнения. Сигнал с компаратора через эмиттерный повторитель (транзистор 10VT3) поступает на выход.

Стабилизаторы напряжения предназначены для получения напряжений, необходимых для устойчивой работы аналоговых частей всего блока СИФУ.

Конструкция блока СИФУ выполнена отдельным блоком на печатных платах, имеющих разъемы. Соответствующие платы взаимозаменяемы, что удобно для ремонта. Для защиты от помех применяется экранирование всего блока и проводов.

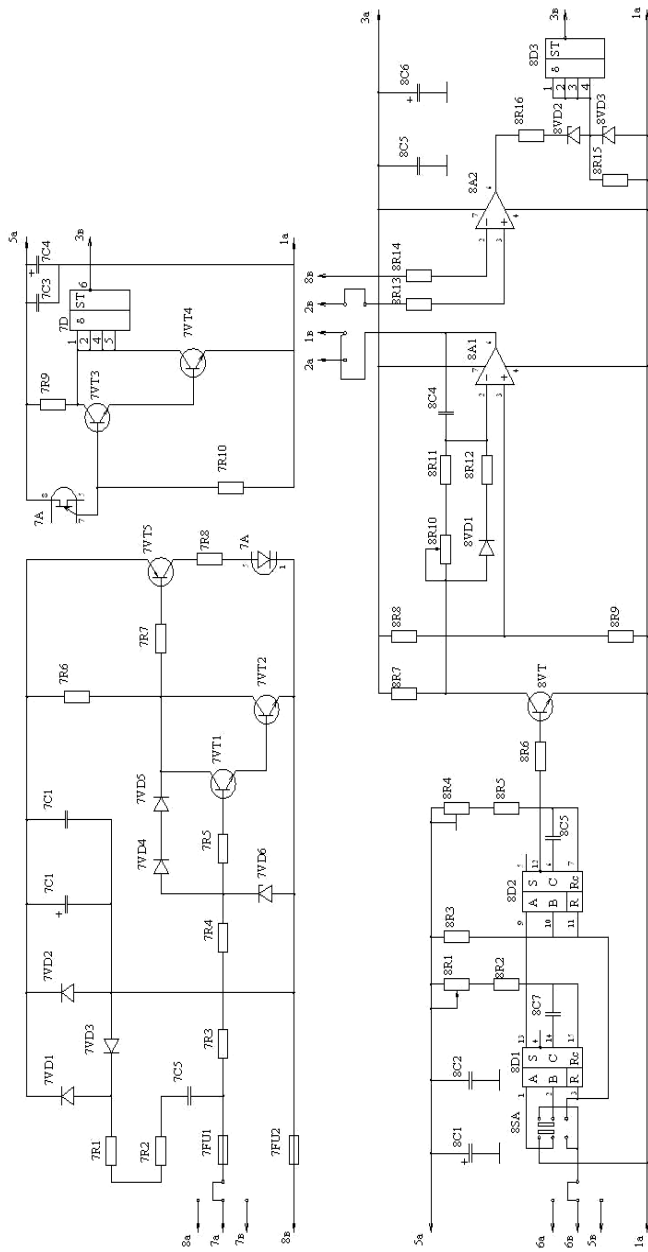
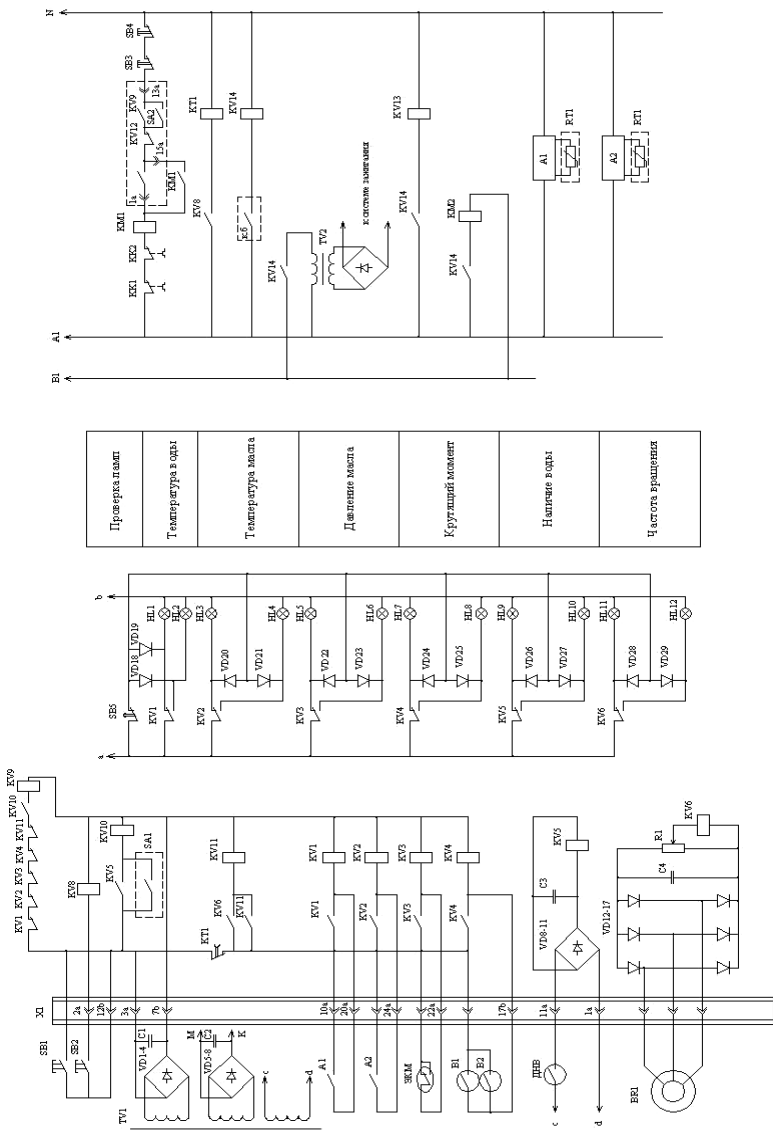


Рисунок Б.2 – Электрическая принципиальная схема блока СИФУ



Проверка масла
Температура в осях
Температура масла
Давление масла
Крутящий момент
Напряжение в осях
Частота вращения

Рисунок Б.4 – Электрическая принципиальная схема управления режимами обкатки стэнда с АВК

Электрическая принципиальная схема и описание работы устройства управления режимами обкатки двигателей на базе стенда ГОСНИТИ

Устройство для автоматизации процесса обкатки двигателей ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238 выполняет следующие функции:

- обкатку двигателей в функции времени (по заранее заданной программе) и в функции технического состояния (по приработке двигателя);
- автоматическое задание и поддержание частоты вращения вала двигателя и нагружающего момента на каждой ступени обкатки в соответствии с техническими условиями на обкатку двигателей;
- автоматическое переключение ступеней обкатки;
- автоматический запуск двигателя;
- автоматическую остановку процесса обкатки после прохождения всех ступеней обкатки или при аварийном режиме.

Блок индикации (рис. В.1).

Блок индикации собран на цифровых интегральных схемах серии К176 и служит для отсчета и индикации времени на весь период обкатки двигателя и для отсчета и индикации номера ступени обкатки.

Микросхемы 1DD1–1DD4 служат, соответственно, для отсчета единиц минут, десятков минут, единиц часов, десятков часов обкатки двигателя. Минутные импульсы на вход микросхемы 1DD1 поступают от задающего генератора (рис. Г.2). Выходы микросхем 1DD1–DD4 через транзисторные ключи, собранные на транзисторах 1VT1–VT 14, 1VT16–1VT29 и резисторах 1R30 – 1R43, 1R45–1R58, соединены с сегментами индикаторных ламп 1HL1–1HL4, которые отображают время обкатки двигателя.

Светодиод 1VD1 служит в качестве разделительной точки и управляется секундными импульсами, поступающими от задающего генератора (рис. В.2) через транзисторный ключ, собранный на транзисторе 1VT15 и резисторе 1R15.

Микросхема 1DD5 служит для отсчета номера ступени обкатки. Входной сигнал поступает из блока выдачи команд (рис. В.3) . Выходы микросхемы 1DD5 через транзисторные ключи, собранные на транзисторах 1VT30–1VT36 и резисторах 1R66–1R72, соединены с сегментами индикаторной лампы 1HL5, которые отображают номер ступени обкатки двигателя.

Блок выполнен на печатной плате и к остальной части схемы подключается при помощи разъема 1X1.

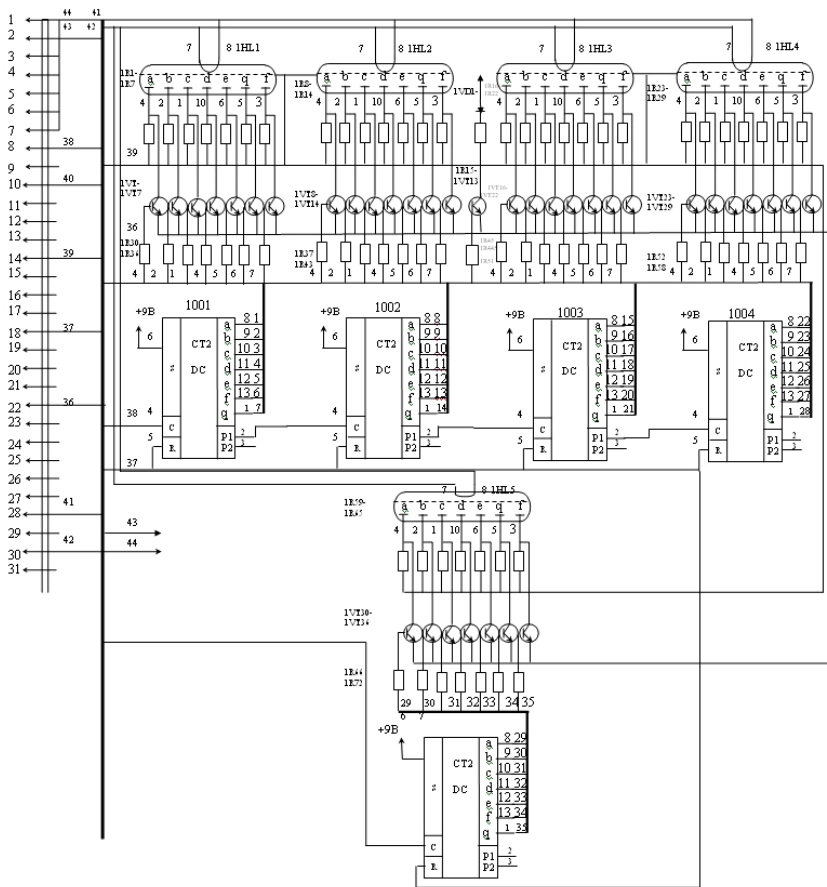


Рисунок В.1 – Принципиальная электрическая схема блока индикации

Блок отчета времени (рис. В.2).

Блок отсчета времени содержит задающий генератор, выполненный на микросхеме 2DD5, резисторах 2R2, 2R3, конденсаторах 2C1 – 2C4. Секундные и минутные импульсы с генератора поступают на плату индикации, кроме этого секундные импульсы поступают на вход микросхемы 2DD1 минутные импульсы через контакт 2KV5 поступает на вход микросхемы 2DD3.

Микросхемы 2DD1–2DD4 служат для отсчета времени обкатки на каждую ступень в отдельности с учетом режима работы станда (по программе или по приработке).

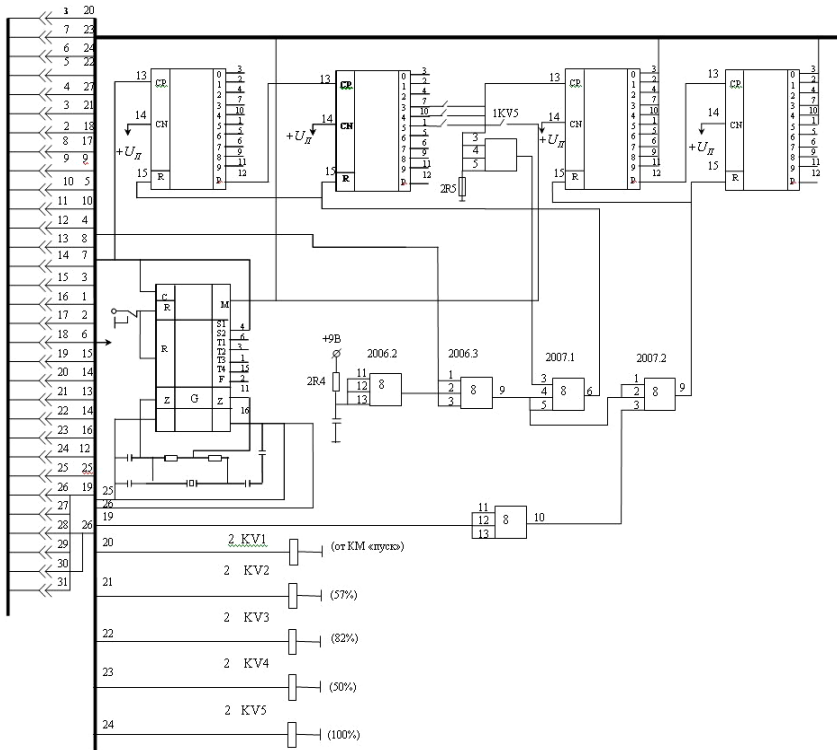


Рисунок В.2 – Принципиальная электрическая схема блока отсчета времени

Реле 2KV1 включается от основного магнитного пускателя станда и запускает задающий генератор. Реле 2KV2, 2KV3 включаются от блока приработки (рис. В.5) и сокращают время обкатки на ступенях в зависимости от приработки двигателя. При включении реле 2KV5 обкатка двигателя происходит по программе, и время обкатки на ступень задается в соответствии с техническими условиями на обкатку двигателей.

На микросхемах 2DD1–2DD6 собрана предварительная установка счетчиков в «0» и установка в «0» счетчиков 2DD1–2DD4 после каждой ступени обкатки.

Блок выполнен на печатной плате и к остальной части схемы подключен при помощи разъема 2X1.

Блок выдачи команд (рис. В.3).

Блок выдачи команд служит для определения времени переключения стэнда со ступени на ступень и выдачи команд в соответствии с технологическим процессом обкатки ДВС.

Узел для определения времени переключения собран на логических элементах 3DD1–3DD4. Микросхемы 3DD1–3DD3 представляют собой набор логических элементов 3И-НЕ. Каждому номеру ступени обкатки соответствует свой элемент 3И-НЕ. На один из входов каждого элемента 3И-НЕ подаются сигналы с выходов микросхемы 3DD6, соответствующий номеру ступени обкатки, на два других входа данного элемента 3И-НЕ подаются сигналы с выходов микросхем 2DD3, 2DD4 (рис. Г.2), соответствующие заданному времени обкатки на данной ступени. При поступлении единичного сигнала на все три входа любого из элементов 3И – НЕ на его выходе появляется сигнал логического «0», который поступает на вход микросхемы 3DD4. Микросхема 3DD4 собирает сигналы со всех выходов микросхем 3DD1–3DD3 и через элемент 3DD5 управляет счетчиками ступеней 3DD6 и 1DD5 (рис. В.1).

На элементе 3DD5.2 собрана предварительная установка в «0» счетчика 3DD6.

На микросхеме 3DD7.1, резисторах 3R1–3R3 и конденсаторах 3C1, 3C2 собрана схема, исключающаядребезг контактов кнопки SB1 (рис. В.9), которая служит для переключения ступеней обкатки. Блок подключен через разъем 3X1.

Блок усилителей команд (рис. В.4).

Блок усилителей команд представляет собой набор транзисторных ключей, которые предназначены для усиления команд номеров ступеней обкатки, поступающих из блока выдачи команд (рис. В.3).

Входы транзисторных ключей соединены с соответствующими выходами микросхемы 3DD6 блока выдачи команд. Выходы транзисторных ключей соединены с реле блока задатчиков режимов, соответствующими данной ступени обкатки (рис. Г.9). Реле 4KV1 и 4KV2 на первой и третьей ступенях обкатки включают блок приработки для опроса технического состояния двигателя. Реле 4KV3 включает реле ЮKV3 (рис. Г.10) для поднятия ножей реостата на время горячей холостой обкатки. Реле 4RV4 включает реле ЮKV1,

ЮКВ2 (рис. В.10) для переключения исполнительных механизмов на время горячей обкатки под нагрузкой. Реле 4КВ7 срабатывает по окончании технологического процесса обкатки и включает реле ЮКВ5 для работы исполнительных механизмов станда на режим работы «Меньше».

Блок управления приработкой (рис. В.5).

Работа устройства управления режимами обкатки двигателей основана на назначении длительности обкатки двигателя на соответствующих ступенях в зависимости от мощности механических потерь в момент измерения, которая определяется по моменту сопротивления прокручиванию на фиксированной частоте вращения, температуры масла и средней скорости изменения мощности механических потерь (выбранного режима). Для упрощения реализации алгоритма управления приработкой все обкатываемые двигатели в зависимости от момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала в момент измерения разделены на три группы: «легкие», «средние» и «тяжелые».

Значение температуры моторного масла определяем по величине сопротивления датчика температуры, установленного в систему смазки двигателя, включенного в плечо измерительного моста и соединенного со входами микросхемы DA1 проводниками 4 и 3 от разъема X1 (рис. В.1 Приложение В).

При помощи подстроечных резисторов R10 и R24 схема настраивается таким образом, чтобы при температуре двигателя $T = 0^{\circ}\text{C}$ напряжение на выходе операционного усилителя DA2 $U_T = 0\text{ В}$, а при температуре $T = 100^{\circ}\text{C}$ напряжение на выходе операционного усилителя DA2 $U_T = 1,0\text{ В}$, то есть температура преобразуется в пропорциональное напряжение.

Аналоговый перемножитель DA6, нормирующий усилитель DA7 и сумматор DA8 служат для вычисления момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала обкатанного двигателя при данной температуре.

На выходе сумматора DA8 появляется сигнал (напряжение), соответствующее вычисленному моменту сопротивления.

Четырехквadrантный аналоговый перемножитель сигналов DA6 с операционным усилителем на выходе предназначен для аналоговой обработки и преобразования сигналов.

Изменяя величину резисторов R26, R36, R40 можно изменить коэффициент схемы линеаризатора, реализованного на DA1, DA2,

DA6, DA7, DA8 и проводить калибровку устройства. На третьем вычитающем элементе, выполненном на сумматоре DA9, производится вычисление разности между моментом сопротивления прокручиванию коленчатого вала обкатываемого двигателя при данной температуре (соответствующее напряжение поступает через проводник 17 от разъема X1 от датчика момента сопротивления) и моментом обкатанного двигателя при данной температуре (соответствующее напряжение поступает с выхода инвертирующего сумматора DA8).

Ключом SA1 задается режим работы устройства. В положение “1” он устанавливается при обкатке двигателей ЯМЗ-236, а в положение “2” – при обкатке двигателей ЯМЗ-238.

Подстроечными резисторами R21–R23 устанавливается момент сопротивления прокручиванию в контрольных точках, подстроечными резисторами R6–R8 – момент сопротивления прокручиванию – соответствующий «легким», «средним» и «тяжелым» двигателям.

На операционных усилителях DA3–DA5 сигнал сравнивается с опорным и усиливается. Затем через соответствующие транзисторы VT1–VT6 срабатывают электромагнитные выходные реле KV1–KV3.

Реле KV1 срабатывает при обкатке «тяжелых» двигателей, KV2 – «средних», а KV3 – “легких”, замыкая цепи, определяющие продолжительность обкатки до следующей контрольной точки или конца обкатки.

Резисторы R19, R24, R25, R27, R30, R31 служат для балансировки и установки масштабных коэффициентов. Для сложения составляющих сигнала используют схему инвертирующего сумматора DA8 на операционном усилителе.

Изменяя величину резисторов R26, R36, R40, можно изменить коэффициент схемы линеаризатора, выполненного на DA1–DA8.

Монтажная плата блока управления приработкой изображена на рисунке Г6, а монтажная плата с размещением элементов – на рис. В7.

Блок обработки обратных связей (рис. В.8).

Для регулирования частоты вращения и нагрузки на валу двигателя в принципиальную схему стенда вводятся обратные связи по частоте вращения и нагружающему моменту. Датчиком частоты вращения является тахогенератор, который крепится в торец вала электрической машины. Вал тахогенератора жестко соединяется с валом электрической машины. При вращении вала тахогенератора на его выходах появляется трехфазное напряжение, амплитуда которого

пропорциональна скорости вращения. Трехфазное напряжение выпрямляется трехфазовым мостовым выпрямителем, собранным на диодах 6VD4–6VD9, и фильтруется конденсатором 6C7. С делителя напряжения на резисторах 6R26 и 6R27 напряжение обратной связи по частоте вращения подается на регулятор частоты вращения (рис. В.10). Подстроечным резистором 6R26 выставляется коэффициент обратной связи по частоте вращения.

Датчиком нагружающего момента на стадии горячей обкатки под нагрузкой является дифтрансформатор, который крепится в весовом механизме стенда. Шток дифтрансформатора через поворотный механизм соединяется со стрелкой измерительного механизма нагружающего момента. Для питания дифтрансформатора на микросхеме 6A1, транзисторе 6VT1, диоде 6VD1, резисторах 6R1–6R7 и конденсаторах 6C1–6C3 собран генератор синусоидального напряжения. Частота колебаний генератора – 100 Гц. Выход генератора через усилитель мощности, собранный на микросхеме 6A2 и транзисторах 6VT2–6VT5, поступает на первичную обмотку дифтрансформатора. Выходное напряжение дифтрансформатора, пропорциональное углу поворота стрелки весового механизма, поступает на вход двухполупериодного детектора, собранного на микросхемах 6A3 и 6A4. Сигнал с выхода двухполупериодного детектора поступает на регулятор момента (рис. В.10).

Питание схемы осуществляется стабилизированным двухполярным напряжением $\pm 15\text{В}$. Блок выполнен на печатной плате и к остальной части схемы подключается при помощи разъема 6X1.

Блок задатчиков режимов обкатки (рис. В.9).

Блок задатчиков режимов обкатки предназначен для задания частоты вращения вала двигателя на стадии холодной и горячей обкатки без нагрузки и для задания частоты вращения вала двигателя и нагружающего момента на стадии горячей обкатки под нагрузкой.

Блок рассчитан на девять ступеней обкатки: из них три ступени холодной обкатки, одна ступень горячей обкатки без нагрузки и пять ступеней горячей обкатки под нагрузкой.

В качестве задатчиков частоты вращения вала ДВС на стадии холодной обкатки применены подстроечные резисторы 9R1–9R3, на стадии горячей обкатки без нагрузки – резистор 9R4, на стадии горячей обкатки под нагрузкой – резисторы 9R5, 9R8, 9R11, 9R15, 9R17. Для задания нагружающего момента на стадии горячей обкатки для

двигателей ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238 применены резисторы соответственно 9R6 и 9R7, 9R9 и 9R10, 9K12 и 9R13, 9R15 и 9R16, 9R18 и 9R19. Все резисторные задатчики частоты вращения вала ДВС через контакты соответствующих им реле подключаются к регулятору частоты вращения. Задатчики нагружающего момента через контакты соответствующим им реле подключаются к регулятору нагружающего момента (рис. В.8). Включение реле производится посредством транзисторных ключей поочередно по ходу процесса обкатки (рис. В.4).

Переключателем SAI устанавливается способ обкатки: по приработке для ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238 и по программе для ЯМЗ-236 и ЯМЗ-238. Кнопкой SBI производится ручное переключение ступеней обкатки.

Блок питания обеспечивает стенд стабилизированным двухполярным напряжением ± 15 В для питания блока обратных связей, стабилизированным напряжением $+9$ В для цифровых микросхем серии К176, напряжением $+24$ В для индикаторных ламп и реле, напряжением $+20$ В для питания индикаторных ламп и напряжением $\sim 1,5$ В питания нитей накала индикаторных ламп.

Блок управления (рис. В.10)

Блок управления предназначен для регулирования частоты вращения вала обкатываемого двигателя и для регулирования нагружающего момента на стадии горячей обкатки под нагрузкой. Для этой цели применены регуляторы соответственно, 10A1 и 10A2.

Сигнал с резисторных задатчиков (рис. В.9), пропорциональный заданной частоте вращения коленчатого вала на данной ступени обкатки, поступает на регулятор 10A1 на клеммы 17, 18, 20. На клеммы 15, 16 поступает сигнал обратной связи по частоте вращения (рис. В.8). В случае неравенства сигнала задатчика и сигнала обратной связи на выходе 7, 8 или 8, 9 регулятора появляется напряжение, которое посредством промежуточных реле управляет исправительным механизмом на устранение ошибки регулирования.

Сигнал с резисторных задатчиков (рис. В.5), пропорциональный заданному нагружающему моменту на данной ступени обкатки, поступает на регулятор 10A2 и на клеммы 17, 18, 20. На клеммы 15, 16 поступает сигнал обратной связи по нагружающему моменту (рис. В.8). В случае неравенства сигнала задатчика и сигнала обратной связи, на выходах 7, 8 или 8, 9 появляется напряжение, которое посредством промежуточных реле управляет исполнительным механизмом на устранение ошибки регулирования.

На стадии холодной обкатки реле 10KV1, 10KV2 отключены и регулятор 10A1 через нормально замкнутые контакты 10KV1 управляет катушками реле 10KV9, 10KV7, которые в свою очередь подают напряжение на исполнительный механизм жидкостного реостата. Выходы регулятора 10A2 на стадии холодной обкатки не используются.

При переходе на горячую обкатку включается реле 10KV1, 10KV2. После переключения выходы регулятора 10A1 оказываются подключенными к катушкам реле 10KV10, 10KV8, которые управляют исполнительным механизмом подачи топлива. Выходы регулятора 10A2 подключаются к катушкам реле 10KV9, 10KV7, которые управляют исполнительным механизмом реостата.

На время горячей холостой обкатки включается реле 10KV3, которое включает исполнительный механизм реостата на поднятие электродов.

Для опроса приработки двигателя, по команде из блока приработки (рис. В.5) срабатывает реле 10KV11, которое включает реле времени 10KT1. С выдержкой времени, необходимой для установки оборотов двигателя (500 мин^{-1}), реле 10KT1 включает реле 10KV13. Реле 10KV13 замыкает катушку реле 10KV12 на предварительно заряженный конденсатор 10C2. Время включения реле 10KV12 есть время опроса приработки двигателя. О ходе процесса обкатки сигнализируют лампочки 10HL1–10HL6. По окончании процесса обкатки срабатывает реле 10KV5, которое убирает подачу топлива. После полного прекращения подачи топлива замыкается концевой выключатель SQ2, включается исполнительный механизм на выход электродов реостата. При полностью выведенных электродах реостата замыкается концевой выключатель SQ1, срабатывает реле 10KV6 и отключается электродвигатель стенда.

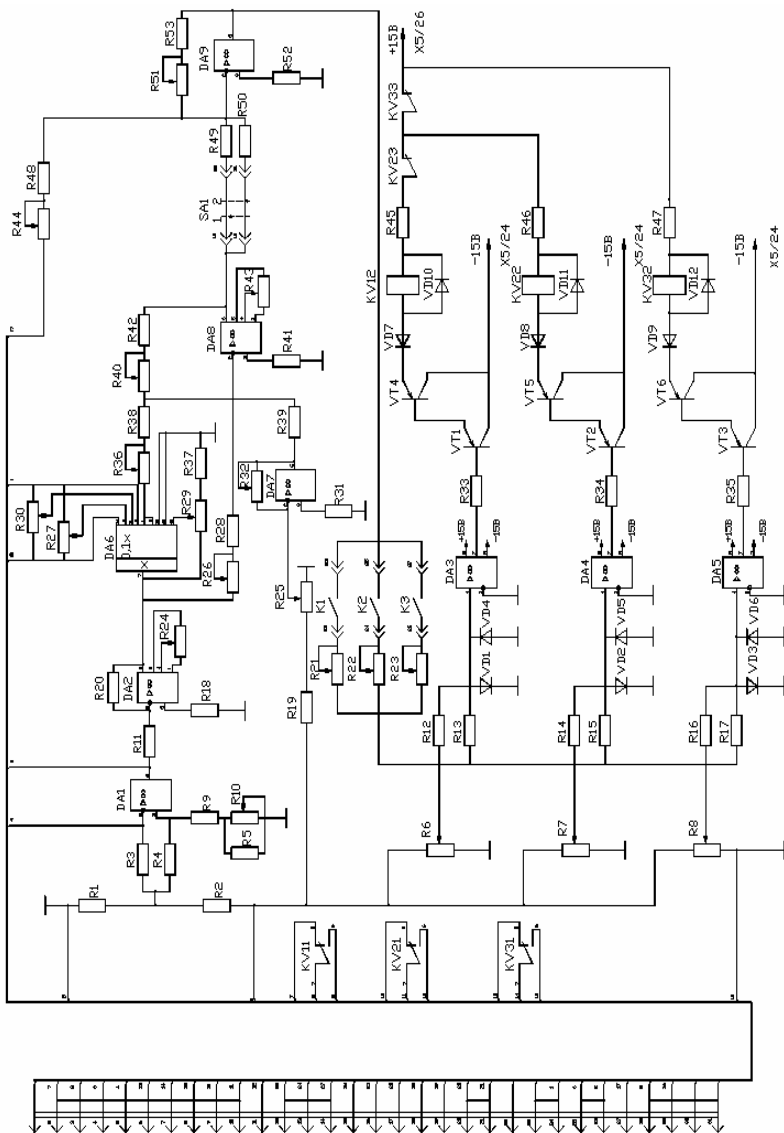


Рисунок В.5 — Принципиальная электрическая схема блока управления приработкой

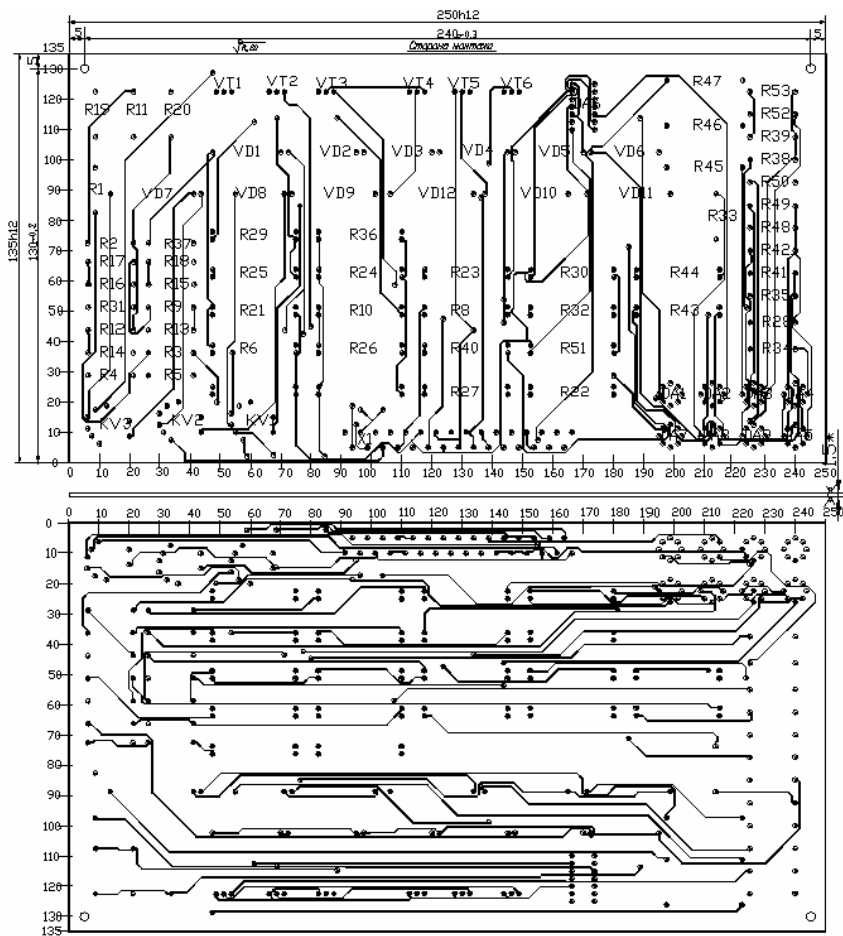


Рисунок В.6 – Монтажная плата блока управления приработкой

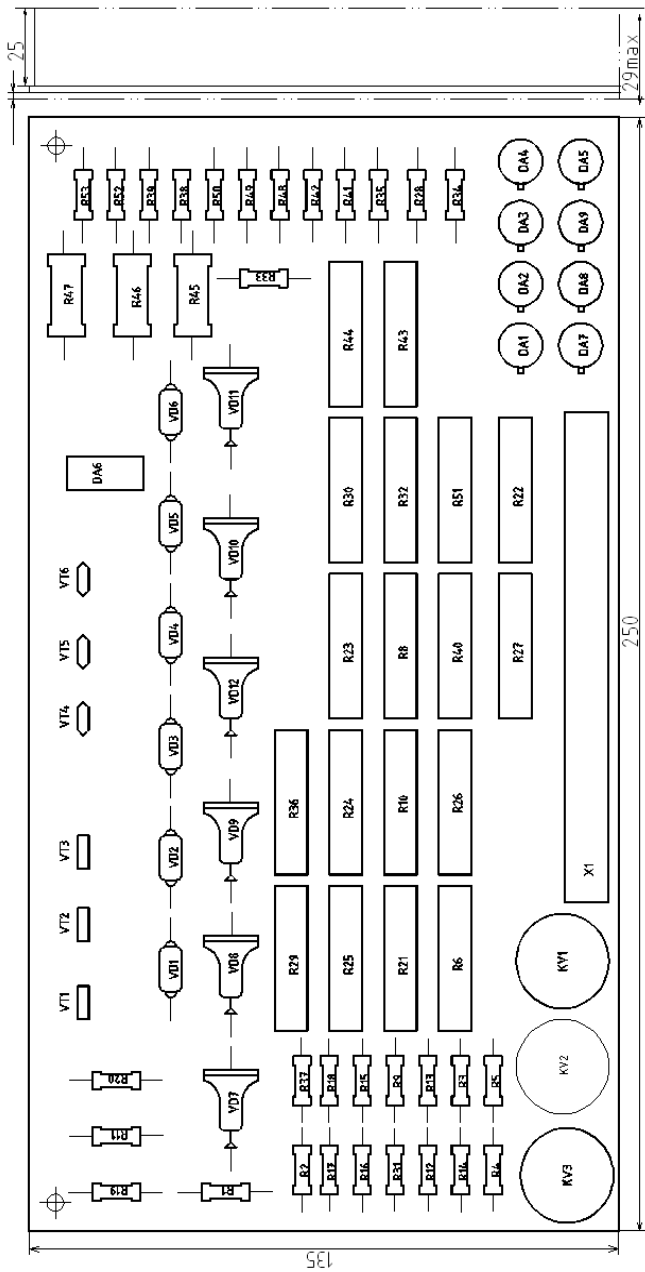


Рисунок В.7 – Монтажная плата блока управления приработкой с размещением элементов

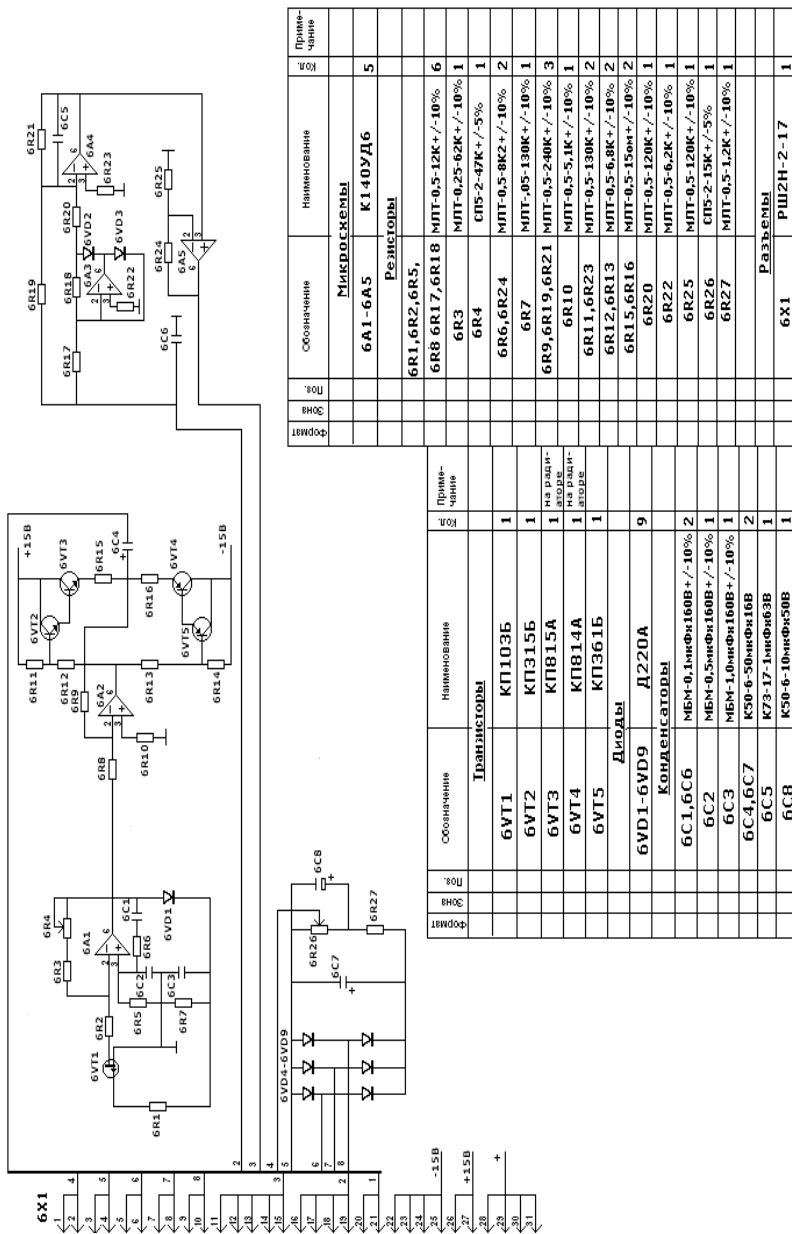


Рисунок В.8 – Принципиальная электрическая схема блока обработки обратных связей

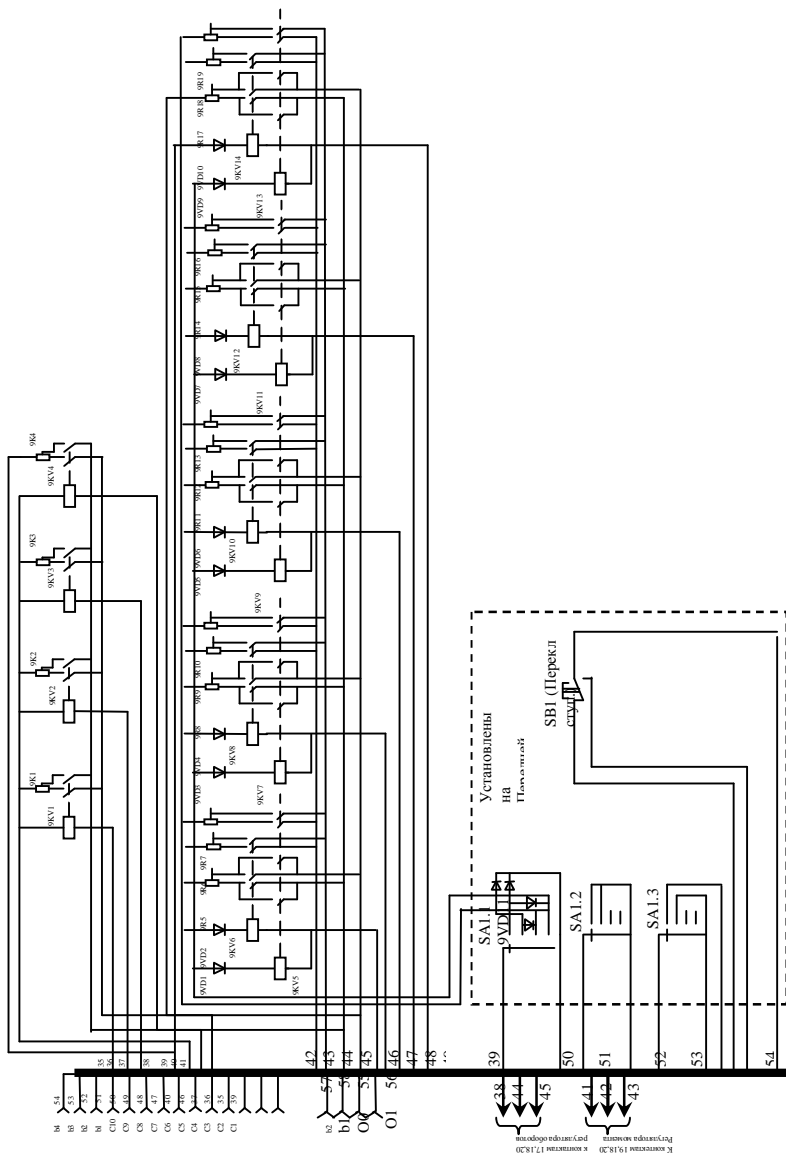


Рисунок В.9 – Принципиальная электрическая схема блока датчиков

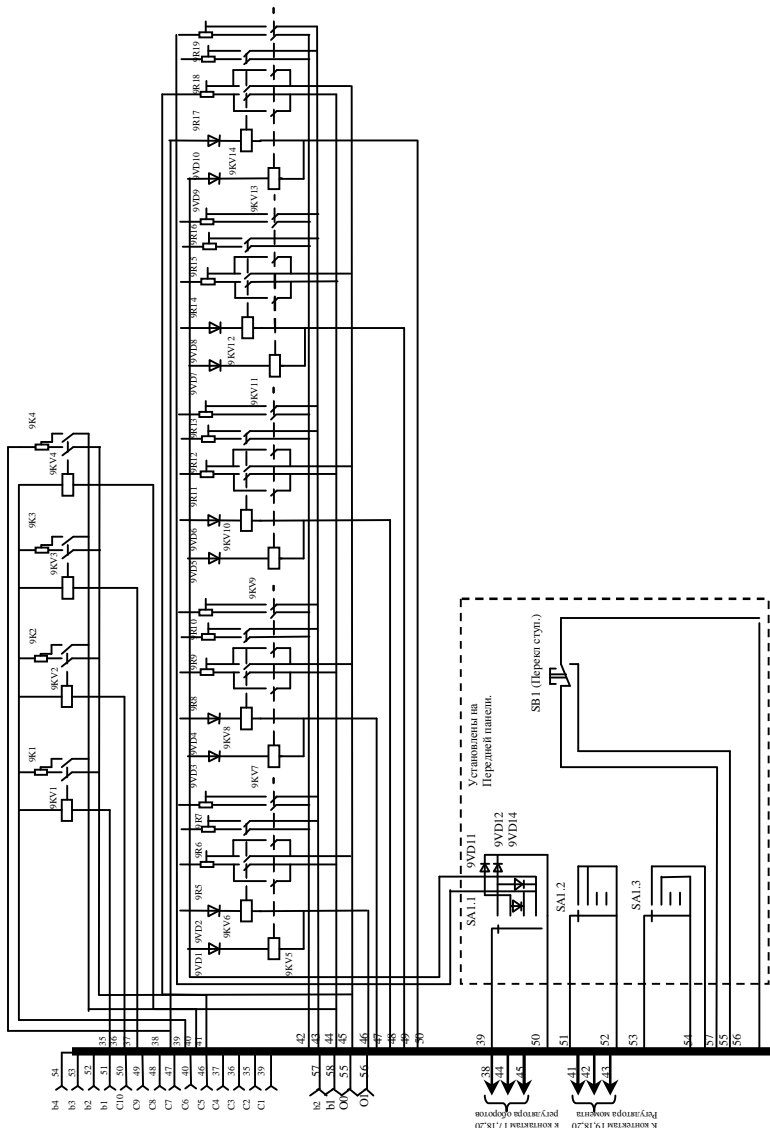


Рисунок В.10 – Принципиальная электрическая схема блока управления

Расчет параметров настройки регулятора

В основе методов расчета оптимальных параметров настройки регулятора лежит экспериментальное исследование динамических параметров объекта с помощью аperiodических входных воздействий.

Объектом управления является обкаточный стенд с двигателем внутреннего сгорания. По управляющему воздействию он имеет параметры:

коэффициент передачи объекта регулирования – $K_{o.p.} = 2,0 \text{ В } \%$ хода регулирующего органа;

постоянная времени объекта регулирования – $T_{o.p.} = 5 \text{ с}$;

время чистого запаздывания объекта регулирования – $\tau_{o.p.} = 1 \text{ с}$.

Максимальное возмущение $X_B = 5 \%$.

Коэффициент передачи датчика регулирования частоты вращения коленчатого вала $K_d = 0,03 \text{ В/об}$.

Требуемые показатели качества регулирования:

$\Delta u_{1 \text{ доп}} = 100 \text{ об}$ – максимальная величина перерегулирования;

$t_{p \text{ доп}} = 20 \text{ с}$ – максимальное допустимое время регулирования;

$\varepsilon_{\text{ст. у. доп.}} = \pm 20 \text{ об.}$ – допустимая статическая ошибка.

Методика выбора наилучшего закона регулирования для обкаточного стенда заключается в определении динамического коэффициента R_d регулирования.

Для этого определяем допустимые значения показателей качества для выходной величины условного объекта:

$$\Delta x_{1 \text{ доп}} = 0,7 K_d \Delta u_{1 \text{ доп}} = 0,7 \cdot 0,03 \text{ В/об} \cdot 100 \text{ об} = 2,1 \text{ В},$$

$$\varepsilon_{\text{ст. х. доп.}} = K_d \cdot \varepsilon_{\text{ст. у. доп.}} = 0,03 \text{ В/об} \cdot 20 \text{ об} = \pm 0,6 \text{ В}.$$

Вычисляем динамический коэффициент регулирования статического объекта:

$$R_d = \frac{DX_{1 \text{ доп}}}{K_{o.p.} X_B} = \frac{2,1 \text{ В}}{2,0 \text{ В/ } \% \cdot 5\%} = 0,21.$$

Он характеризует эффективность воздействия регулятора, снижающего динамическое отклонение регулируемые величины от задания.

Вычисляем отношение:

$$\frac{t_{o.p.}}{T_{o.p.}} = \frac{1c}{5c} = 0,20.$$

Учитывая технологические особенности объекта – обкаточного стенда с двигателем внутреннего сгорания – выбираем процесс с 20 % -ным перерегулированием. По значениям R_d и $\tau_{o.p.}/T_{o.p.}$ находим точку на номограмме рис. 3.15.б [134, с. 129] с координатами (0,20 : 0,21) и по ближайшей проходящей ниже кривой выбираем пропорционально-интегральный (ПИ)-закон регулирования (ПИ-регулятор). Соответствующий этой кривой тип регулятора обеспечивает:

$$\Delta x_1 \leq \Delta x_{1 \text{ доп.}}$$

По [134, с. 130, табл. 3.3] находим значение относительного времени регулирования: ($\varphi=12$)

$$t_p = \varphi \tau_{o.p.} = 12 \cdot 1 = 12 \text{ с.}$$

Проверяем обеспечение значения времени регулирования требованиями технологического процесса:

$$t_p < t_{p \text{ доп.}}$$

$$12 \text{ с} < 20 \text{ с.}$$

Требование удовлетворяется.

При выбранном ПИ-регуляторе статическая ошибка $\epsilon_{ст.} = 0$. Следовательно, ПИ-регулятор обеспечивает все требуемые показатели качества.

Для объектов с самовывравниванием по значению относительно запаздывания $\frac{\tau_{o.p.}}{T_{o.p.}}$ находим оптимальные значения безразмерных комплексов, по которым по известным параметрам объекта определяют оптимальные параметры настройки регулятора для выбранного заранее критерия оптимальности.

Рассчитаем параметры настройки регуляторов с достаточным запасом устойчивости системы:

$$\frac{t_{o.p.}}{T_{o.p.}} = 0,2.$$

По соответствующим номограммам [89, с. 863, рис. 14.25.б] находятся значения оптимальных параметров настройки регуляторов:

$$(K_p \cdot K_{o.p.})_{\text{опт.}} = 3,0;$$

$$(T_u / \tau_{o.p.})_{\text{опт.}} = 2,6.$$

Вычислим:

$$K_{p. \text{ опт}} = \frac{3,0}{K_{o.p.}} = \frac{3,0}{2,0} = 1,5 \text{ \% хода РО / В.}$$

$$T_{u \text{ опт}} = 2,6 \tau_{o.p.}$$

$$T_{u \text{ опт}} = 2,6 \text{ 1с} = 2,6 \text{ сек.}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Экономическая оценка эффективности замены действующего оборудования

Целью работы является расчет взаимосвязанных технико-экономических показателей (натуральные показатели, исходные стоимостные показатели, критерии оценки эффективности капиталовложений в проект) и определение целесообразности инвестиций в модернизацию устройства управления обкаточным стендом.

Стоимостные показатели приведены в ценах по состоянию на 29 декабря 2017 г. Исходные данные приведены в табл. Е.1

Таблица Д.1

Исходные данные для расчета экономической эффективности модернизации устройства управления обкаткой двигателя ЯМЗ-236М

Наименование показателей	Ед. изм.	Обозначения	Базовый вариант (1)	Проектный вариант (2)
Время подготовки и обкатки одного двигателя ЯМЗ-236М	час	t	2,98	2,75
В том числе:				
холодная приработка	час	t_x	0,85	0,71
горячая приработка без нагрузки	час	$t_{гбн}$	0,17	0,15
горячая приработка под нагрузкой	час	$t_{гпн}$	0,58	0,49
Коэффициент сменности	-	$k_{см}$	1,0	1,0
Расход на обкатку 1 двигателя:				
- дизтоплива	литр	D_T	22,5	19,1
- масла М10В ₂	литр	M	2,9	2,5
Переводной коэффициент перевода из литров в кг:				
- дизтоплива	-	$K_{ПД}$	0,84	0,84
- масла	-	$K_{ПМ}$	0,86	0,86
Установленная мощность токоприемников	кВт	N	160,0	160,5
Дополнительные капитальные вложения	руб.	ΔK	–	6800

Проектом предусматривается применение нового устройства управления стендом для обкатки дизелей с контролем их технического состояния по мощности механических потерь.

За базовый вариант принимаем широко применяемый в ремонтном производстве обкаточный стенд КИ-5274 ГОСНИТИ.

Реализация устройства управления стендом для обкатки двигателя внутреннего сгорания с контролем их технического состояния по мощности механических потерь с учетом температуры масла и скорости изменения режимов нагрузки позволяет автоматизировать процесс и сократить среднюю продолжительность обкатки двигателей на 15 %, сэкономив топливно-энергетические ресурсы и уменьшив загрязнение окружающей среды.

Все показатели рассчитываются по нижеприведенным формулам [135, 136, 137] для двух вариантов – базового и проектируемого. При этом базовому варианту присваивается индекс 1, проектируемому – индекс 2.

Натуральные технико-экономические показатели

Годовая производственная программа (V), штук определяется по формуле:

$$V = (t_{\text{см}} k_{\text{см}} / t) T_{\text{год}}, \quad (\text{Д.1})$$

где $t_{\text{см}}$ – рабочее время смены, час (8);

$k_{\text{см}}$ – коэффициент использования рабочего времени смены ($K_{\text{см}} = 1,0$);

$T_{\text{год}}$ – число рабочих дней в году (253).

Годовая производственная программа зависит от времени подготовки и обкатки одного двигателя (включая холодную приработку, горячую приработку без нагрузки, горячую приработку под нагрузкой).

Затраты труда рабочих ($ЗТ$), ч, определяем из выражения:

$$ЗТ = \frac{n_p t}{k_{\text{см}}}, \quad (\text{Д.2})$$

где n_p – число рабочих, чел ($n_p = 1,0$);

t – время подготовки и обкатки одного двигателя, ч.

Производительность труда (ПТ), шт/ч, находим из отношения:

$$\text{ПТ} = \frac{V}{ЗТ}, \quad (\text{Д.3})$$

где V – годовая производственная программа, шт.

Прирост производительности труда, %:

$$\text{ДПТ} = \frac{\text{ПТ}_1 - \text{ПТ}_2}{\text{ПТ}_1} 100. \quad (\text{Д.4})$$

Расход дизтоплива (B_H), кг, определяется по формуле [136, с. 42]:

$$B_H = b_T V, \quad (\text{Д.5})$$

где b_T – расход дизтоплива на обкатку одного двигателя, кг.

Расход масла (B_M), кг, определяется по формуле:

$$B_M = b_M \times V, \quad (\text{Д.6})$$

где b_M – расход масла на обкатку одного двигателя, кг.

Расход электроэнергии (W), кВт⋅ч:

$$W = W_{\text{уд}} V, \quad (\text{Д.7})$$

где $W_{\text{уд}}$ – расход электроэнергии на обкатку одного двигателя, кВт⋅ч.

В свою очередь,

$$W_{\text{уд}} = N \times (t_x + t_{\text{гпп}}), \quad (\text{Д.8})$$

где N – установленная мощность токоприемников обкаточного стенда, кВт.

Годовая экономия электроэнергии, кВт⋅ч:

$$\Delta \mathcal{E} = (\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2) \times k_p, \quad (\text{Д.9})$$

где $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ – затраты на электроэнергию по вариантам, кВт⋅ч;

k_p – коэффициент рекуперации, $k_p=0,5$ [8, с. 65].

Годовая экономия дизтоплива:

$$\Delta D = (b_{T1} - b_{T2}) \times K_{\text{пд}} \times V_2. \quad (\text{Д.10})$$

Исходные стоимостные показатели

К стоимостным показателям, которые служат основой для расчета эффективности модернизации обкаточного стенда, относятся капиталовложения, текущие издержки, прирост прибыли и доход от инвестиций.

При расчете капиталовложений (K) учтена стоимость устройства управления стендом для обкатки дизелей с контролем их технического состояния по мощности механических потерь, затраты на монтаж и транспортные расходы.

Текущие издержки по вариантам (C_1 и C_2), связанные с эксплуатацией обкаточного стенда, определяются как сумма элементов затрат из выражений:

в базовом варианте:

$$C_1 = Z_1 + O_{C1} + T_1 + \text{Э}_1; \quad (\text{Д.11})$$

в проектируемом варианте:

$$C_2 = Z_2 + O_{C2} + A + P + T_2 + \text{Э}_2, \quad (\text{Д.12})$$

где Z – заработная плата слесаря – испытателя, руб.;

O_C – отчисления на социальные нужды, руб.;

A – амортизационные отчисления по оборудованию устройства управления стендом для обкатки дизелей с контролем их технического состояния, руб.;

P – затраты на ремонт и техническое обслуживание, руб.;

T – затраты на топливо, руб.;

Э – затраты на электроэнергию, руб.

Расходы на оплату труда слесаря-испытателя (Z) определяются по формуле [135, с. 604]:

$$Z = C_T ZT k_3, \quad (\text{Д.13})$$

где C_T – часовая тарифная ставка, руб. ($C_{T1} = C_{T2} = 2,71$ руб. в час для слесаря – испытателя 5-го разряда);

ZT – затраты труда, ч;

k_3 – коэффициент, учитывающий надбавки к тарифу ($k_3 = 1,8$).

Отчисления на социальные нужды (O_C), руб.:

$$O_C = Z \frac{a_o}{100}, \quad (\text{Д.14})$$

где a_o – процент отчислений на социальные нужды, равный 36%.

Амортизационные отчисления (A), руб. определяются по формуле:

$$A = \frac{a}{100} DK, \quad (Д.15)$$

где a – годовая норма амортизационных отчислений для станда, % ($a = 10,0$ %);

DK – капиталовложения в устройство управления модернизированным стандом, руб.

Аналогично определяются затраты на ремонт и техническое обслуживание (P), руб. автоматизированной системы управления:

$$P = \frac{p_1}{100} DK, \quad (Д.16)$$

где p_1 – годовая норма отчислений на ремонт и ТО ($p_1 = 3,5$ %).

Затраты на горюче-смазочные материалы (T), руб. рассчитываются по формуле:

$$T = C_T \times B_H + C_M \times B_M, \quad (Д.17)$$

где C_T – цена дизельного топлива, руб./ кг;

B_H – расход дизельного топлива, кг;

C_M – цена масла, руб./кг;

B_M – расход масла, кг.

Затраты на электроэнергию (\mathcal{E}) в сравниваемых вариантах определяются следующим образом:

$$\mathcal{E} = C_{\mathcal{E}} W, \quad (Д.18)$$

где $C_{\mathcal{E}}$ – действующий тариф на электроэнергию, $C_{\mathcal{E}} = 0,25197$ руб. / кВт·ж;

W – расход электроэнергии, кВт·ж.

Экономия текущих издержек ($\mathcal{E}\mathcal{Z}$) составит:

$$\mathcal{E}\mathcal{Z} = (Z_1 + O_{C1} + T_1 + \mathcal{E}_1) - (Z_2 + O_{C2} + T_2 + \mathcal{E}_2 + A + P). \quad (Д.19)$$

Для сопоставления элементов текущих затрат по вариантам результаты расчетов представляем в виде таблицы.

Изменение элементов текущих затрат при обкатке двигателя ЯМЗ-236М

Элементы затрат, руб.	Варианты		Изменения, ±
	Базовый	Проектируемый	
Заработная плата	10715,98	9890,54	+825,44
Отчисления на соц. нужды	3857,75	3560,59	+297,16
Затраты на горюче-смазочные материалы	23281,83	19832,67	+3449,16
Затраты на электроэнергию	42488,05	35766,7	+6721,35
Амортизационные отчисления	-	680,0	-680,0
Затраты на ремонт и ТО	-	238,0	-238,0
ИТОГО:	80343,61	69968,5	+10375,11

Прирост прибыли предприятия (Π) при внедрении автоматизированной системы управления равен экономии текущих затрат, руб.

$$\Pi = \text{ЭЗ}, \quad (\text{Д.20})$$

а ежегодный доход от инвестиций (Д) определяется из выражения:

$$\text{Д} = \Pi + \text{А} - \text{Н}, \quad (\text{Д.21})$$

где Н – изменение суммы налогообложения, руб.

Вместе с тем, это не полный годовой эффект, поскольку он не учитывает экологического эффекта, в связи с чем, полный годовой доход равен, руб.:

$$\text{Д} = \Pi + \text{А} - \text{Н} + \Delta \text{Э}_k, \quad (\text{Д.22})$$

где $\Delta \text{Э}_k$ – годовой экологический эффект, руб., в свою очередь:

$$\Delta \text{Э}_k = \text{Э}_{y_1} - \text{Э}_{y_2}, \quad (\text{Д.23})$$

где Э_{y_1} и Э_{y_2} – годовой ущерб от выброса в атмосферу при сгорании дизтоплива в первом и втором вариантах, руб.

$$\text{Э}_{y_1} = \text{Д}_T \times \text{К}_{\text{ПД}} \times \text{Н}_D \times V, \quad (\text{Д.24})$$

где Н_D – ставка налога за выброс загрязняющих веществ при сжигании дизтоплива (Приложение 6 к Налоговому кодексу Республики Беларусь).

Критерии оценки эффективности капиталовложений

В международной практике для оценки эффективности инвестиций принимается система показателей, основанных на принципе дисконтирования.

Для оценки эффективности капиталовложений следует рассчитать показатели:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД);
- индекс доходности инвестиций (ИД);
- динамический срок окупаемости капиталовложений (T_0).

Финансово-экономические расчеты выполняются при следующих условиях: расчетный период (горизонт расчета) $T = 10$ лет; процентная ставка $E = 0,15$. Эффективность проекта рассчитывается за длительный период времени (расчетный период), который принимается равным нормативному сроку службы оборудования. При оценке эффективности рассредоточенные во времени денежные потоки ИП должны быть приведены к текущему периоду с помощью специального приема, называемого дисконтированием.

Чистый дисконтированный доход ЧДД показывает весь эффект инвестора, приведенный во времени к началу расчетного периода. ЧДД определяется из выражения [111], руб.:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=t_0+1}^T \frac{D_t}{(1+E)^t} + \frac{Л}{(1+E)^T} - K_H, \quad (\text{Д.25})$$

где D_t – доход, получаемый на t -м шаге расчета, руб.;

T – расчетный период, или горизонт расчета, лет;

K_H – капиталовложения, приведенные во времени к началу расчетного периода, руб.;

$Л$ – ликвидационная стоимость, руб.;

t_0 – отрезок времени (в годах), отделяющий начало расчетного периода от того года, когда проект начинает приносить доход.

Дисконтирование капиталовложений осуществляется в тех случаях, когда строительство предусмотренного проектом объекта превышает один год (лаг), а также, если в проекте задействовано оборудование, требующее замены в течение расчетного периода, т. е. у которого $T_{\text{сл}} < T$.

Проект целесообразен при $\text{ЧДД} \geq 0$.

Если годовой доход постоянен ($D_t = const$), то при условии, что можно пренебречь ликвидационной стоимостью, ЧДД определяют по упрощенной формуле, руб.:

$$\text{ЧДД} = D_t a_T - K_H, \quad (\text{Д.26})$$

где a_T – дисконтирующий множитель, определяемый из выражения:

$$a_T = \frac{1 - (1 + E)^{-T}}{E} = \frac{(1 + E)^T - 1}{E(1 + E)^T}. \quad (\text{Д.27})$$

При наличии строительного лага и лага освоения объекта ЧДД определяется из выражения, руб.:

$$\text{ЧДД} = \frac{D_t a_{T_\Phi}}{(1 + E)^{t_0}} - K_H, \quad (\text{Д.28})$$

где t_0 – временной лаг, год;

a_{T_Φ} – дисконтирующий множитель, определяемый за тот отрезок времени, в течение которого от проекта получают доход ($T_\Phi = T - t_0$).

Индекс доходности инвестиций (ИД) показывает, во сколько раз увеличиваются вложенные собственные средства за расчетный период в сравнении с нормативным увеличением на уровне базовой ставки, он определяется из выражения:

$$\text{ИД} = \text{ЧДД} / K_H + 1. \quad (\text{Д.29})$$

Проект целесообразен при $\text{ИД} \geq 1$.

Динамический срок окупаемости (T_O) соответствует времени, за которое инвестор возвратит израсходованные средства и получит нормативный доход на уровне принятой ставки. Он рассчитывается по накопительному дисконтированному доходу из уравнения, решаемого относительно T_O :

$$\sum_{t=1}^{T_O} \frac{D_t}{(1 + E)^t} - K = 0. \quad (\text{Д.30})$$

Уточненное значение можно определить методом линейной интерполяции из выражения:

$$T_o = T_{\text{MIN}} + (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \frac{\text{ЧДД}_{\text{MIN}}}{\text{ЧДД}_{\text{MAX}} + \text{ЧДД}_{\text{MIN}}}, \quad (\text{Д.31})$$

где T_{min} , T_{max} – минимальное и максимальное значения времени в интервале;

ЧДД_{MIN} , ЧДД_{MAX} – минимальное и максимальное значения ЧДД в интервале.

При постоянстве годового дохода ($D_t = \text{const}$) и отсутствии временного лага динамический срок окупаемости определяется из выражения [135, с. 606]:

$$T_o = \frac{\lg(1 + E / P_B)}{\lg(1 + E)}, \quad (\text{Д.32})$$

где P_B – коэффициент возврата капитала, равный

$$P_B = \frac{D_t}{K} - E. \quad (\text{Д.33})$$

Проект считается целесообразным при сроке возврата капитала в пределах расчетного периода, т. е. T_o должно быть меньше T .

Результаты расчетов сводим в табл. Д.3.

Полученные значения критериальных показателей эффективности капитальных вложений модернизации устройства управления обкаточным стандом свидетельствуют о целесообразности реализации проекта.

Таблица Д.3

Показатели экономической эффективности модернизации устройства управления обкаткой двигателей ЯМЗ-236М

Наименование показателей	До внедрения	После внедрения	+;-
Годовая производственная программа, шт.	680	737	+57
Удельный расход дизтоплива, л/шт.	22,5	19,1	-3,4
Годовая экономия дизтоплива, т	-	2,1	-
Годовая экономия электроэнергии, кВт·ч	-	13339,7	-
Прямые затраты труда на обкатку одного двигателя, ч/шт.	2,98	2,75	-0,23
Прирост производительности труда, %	100,0	115,0	+15,0

Наименование показателей	До внедрения	После внедрения	+; -
Годовой экологический эффект, руб.	1761,78	1495,55	-266,23
Годовой доход, руб.	-	9453,82	-
Чистый дисконтированный доход, руб.	-	4110,32	-
Индекс доходности	-	1,61	-
Срок возврата капитальных вложений, лет	-	2,0	-

Чистый дисконтированный доход при этом для дизеля ЯМЗ-236М составляет 4110 рублей, срок возврата капитальных вложений 2 года при годовой экономии 2,1 тонны дизтоплива и 13340 кВт·ж электроэнергии, годовом экологическом эффекте 266 рублей, а для дизеля ЯМЗ-238М чистый дисконтированный доход составляет 4301 рублей, срок возврата капитальных вложений 1,9 года при годовой экономии 2,3 тонны дизтоплива и 12018 кВт·ж электроэнергии, годовом экологическом эффекте 289 рублей.

Предлагаемая методика может быть использована ремонтными предприятиями при обосновании решений о модернизации обкаточных стендов.

Исходные данные и результаты расчетов для двигателя ЯМЗ-238М приведены в табл. Д.4 и Д.5.

Таблица Д.4

Исходные данные для расчета экономической эффективности модернизации устройства управления обкаткой двигателя ЯМЗ-238М

Наименование показателей	Ед. изм.	Обозначения	Базовый вариант (1)	Проектир. вариант (2)
Время подготовки и обкатки одного двигателя ЯМЗ-238М	час	t	3,31	3,04
В том числе:				
холодная приработка	час	t_x	0,85	0,71
горячая приработка без нагрузки	час	$t_{гбн}$	0,17	0,15
горячая приработка под нагрузкой	час	$t_{гпн}$	0,58	0,49
Коэффициент сменности	-	$k_{см}$	1,0	1,0
Расход на обкатку 1 двигателя:				
- дизтоплива	литр	D_T	28,3	24,2
- масла М10В ₂	литр	M	4,1	3,5
Переводной коэффициент перевода из литров в кг:				
- дизтоплива	-	$K_{ПД}$	0,84	0,84
- масла	-	$K_{ПМ}$	0,86	0,86

Окончание таблицы Д.4

Наименование показателей	Ед. изм.	Обозначения	Базовый вариант (1)	Проектир. вариант (2)
Установленная мощность токоприемников	кВт	N	160,0	160,5
Дополнительные капитальные вложения	руб.	ΔK	-	6800,0

Таблица Д.5

Изменение элементов текущих затрат по обкатке двигателя ЯМЗ-238М

Элементы затрат, руб.	Варианты		Изменения, ±
	Базовый	Проектируемый	
Заработная плата	10723,6	9847,12	+876,48
Отчисления на соц. нужды	3860,5	3544,96	+315,54
Затраты на горюче-смазочные материалы	27131,04	23186,88	+3944,16
Затраты на электроэнергию	38279,6	32223,92	+6055,68
Амортизационные отчисления	-	680,0	- 680,0
Затраты на ремонт и ТО	-	238,0	- 238,0
Итого:	79994,74	69720,88	+10273,86

Таблица Д.6

Показатели экономической эффективности модернизации устройства управления обкаткой двигателей ЯМЗ-238М

Наименование показателей	До внедрения	После внедрения	+; -
Годовая производственная программа, шт.	611	664	+53
Удельный расход дизтоплива, л	28,3	24,2	-4,1
Годовая экономия дизтоплива, т	-	2,3	-
Годовая экономия электроэнергии, кВт·ч	-	12018,4	-
Прямые затраты труда на обкатку одного двигателя, ч/шт.	3,31	3,04	-0,27
Прирост производительности труда, %	100	115,5	+15,5
Годовой экологический эффект, руб.	1996,44	1707,20	-289,24
Годовой доход, руб.	-	9493,8	
Чистый дисконтированный доход, руб.	-	4301,07	-
Индекс доходности	-	1,63	-
Срок возврата капитальных вложений, лет	-	1,9	-

**МЕТОДИКА
проведения приработки дизелей ЯМЗ-236М с определением
длительности обкатки на режимах**

1. Общие технические требования

1.1. Каждый отремонтированный двигатель должен быть подвергнут приработке и испытаниям на стенде.

1.2. В процессе приработки и стендовых испытаний двигателей должны выполняться требования техники безопасности и производственной санитарии, предусмотренные действующими стандартами, техническими условиями и технической документацией на двигатели, испытательные стенды, измерительные приборы, топливо, масла и т. д.

1.3. Поступающий на приработку и испытания двигатель должен быть чистым и сухим.

1.4. Двигатели, поступающие на приработку и испытания, должны быть второй комплектности.

1.5. Стенды, предназначенные для приработки и испытаний двигателей, должны быть оборудованы приборами, обеспечивающими возможность выполнения требований и контроля параметров. Параметры должны измеряться с точностью не ниже:

1) частота вращения	$\pm 55_{\text{мин}}^{-1}$;
2) время	± 30 с (при замере расхода топлива $\pm 0,1$ с);
3) температура масла	± 3 °С;
4) температура охлаждающей жидкости	± 3 °С;
5) давление масла	± 20 кПа ($\pm 0,2$ кгс/см ²);
6) нагрузка	± 1.0 даН (кгс);
7) расход топлива	± 2.5 %.

1.6. Данные в настоящем разделе значения мощности и расхода топлива указаны для стандартных атмосферных условий.

1.7. В процессе приработки рекомендуется применять централизованную систему подачи смазки. В указанной системе температура масла, подаваемого в двигатель, должна быть не ниже 50 °С, давление масла на входе в двигатель 400–500 кПа (4–5 кгс/см²).

При отсутствии централизованной системы подачи смазки масло должно быть залито в поддон двигателя до верхних меток указателей уровня масла.

1.8. Температура воды в двигателе должна быть 60–70 °С, проверять по завершении холодной приработки.

1.9. Приработка и испытания должны проводиться на масле М-10 В2 ГОСТ 8581–78 и дизельном топливе по ГОСТ 305–82.

1.10. При обнаружении дефектов приработка должна быть приостановлена, а после их устранения продолжена.

1.11. Режимы приработки дизелей без учета их технического состояния приведены в табл. 1.1.

1.12. Для назначения индивидуальной продолжительности послеремонтной стендовой приработки дизелей с учетом их технического состояния определяется общая продолжительность обкатки – t (мин) по формуле:

$$\tau = 56,5 \times N_{mn0} + 1,875 \times T_{m0} - 528,625, \quad (1)$$

где N_{mn0} – мощность механических потерь в начале обкатки, кВт;

T_{m0} – температура масла в начале обкатки, °С.

1.13. Мощность механических потерь N_{mn} рассчитывается для каждого двигателя, подлежащего обкатке, до начала приработки при частоте вращения коленчатого вала 500 мин⁻¹ по формуле:

$$N_{mn} = M_{кр} \times n / 9550, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент, Нж;

n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹.

1.14. Крутящий момент двигателя $M_{кр}$, в свою очередь, определяется как

$$M_{кр} = P_{Вес} \times l, \quad (3)$$

где $P_{Вес}$ – показание измерительного устройства стенда, Н;

$l = 0,7162$ м – плечо весового устройства стенда.

1.15. Находим отношение t / t_a ,

где $t_a = 95$ мин – продолжительность режима приработки по РК РБ 00017590.441–95 (табл. 1.1).

1.16. Продолжительность каждого этапа приработки определяется умножением продолжительности соответствующего этапа из таблицы 1.1 на отношение t / t_a .

2. Технические требования к холодной приработке

2.1. Перед началом холодной приработки следует прогреть двигатель горячей водой в течение 5...7 минут.

2.2. В начале приработки необходимо проверить подачу масла к подшипникам коромысел через штанги толкателей и герметичность уплотнений форсунок в головках цилиндров. В процессе холодной приработки следует проверять на ощупь нагрев блока цилиндров в зоне цилиндров, коренных подшипников и нагрев головок цилиндров.

Таблица 1.1

Режимы приработки и приемо-сдаточных испытаний двигателей ЯМЗ-236М

Стадия приработки или контрольная операция	Этап	Частота вращения коленчатого вала, мин	Нагрузка		Продолжительность, мин	
			расчетная, кВт (л. с.)	По шкале весового механизма кгс (Н. м)	этапа	стадии или операции
Холодная без нагрузки	1	800	-	-	20	50
	2	1200	-	-	20	
	3	1400	-	-	10	
Горячая без нагрузки	4	1500	-	-	10	10
Горячая под нагрузкой	5	1600	22(30)	18,7(132)	10	35
	6	1700	44(60)	35,3(249)	10	
	7	1800	66(90)	50(352)	5	
	8	1900	88(120)	63,2(445)	5	
	9	2000	102(139)	69,5(489)	5	
ИТОГО						95
Проверка работы двигателя на переменных нагрузках	Режимы приемо-сдаточных испытаний					
	1700 2100	44,2...112 (60...152)	35...72,5 248...510	3		

Стадия приработки или контрольная операция	Этап	Частота вращения коленчатого вала, мин	Нагрузка		Продолжительность, мин	
			расчетная, кВт (л. с.)	По шкале весового механизма кгс (Н м)	этапа	стадии или операции
Режимы приемо-сдаточных испытаний						
Проверка оборотов холостого хода: - минимальных; - максимальных	450...550 2225...2275		-	-	3	
			-	-	2	
Проверка развиваемой мощности, что соответствует расходу 500 г топлива за время min 55,6 с	2100		120(162) min	77(543) min	3	
Итого:					11	

В табл. 1.1 нагрузка по показаниям весового механизма дана при длине расчетного плеча силоизмерительного механизма и равняется 716,2 мм.

2.3. Шум прирабатываемого двигателя должен быть ровным, без резко выделявшихся местных шумов и стуков. Для уточнения повышенного местного шума или стука следует использовать стетоскоп.

2.4. По окончании холодной приработки рекомендуется сменить масло в поддоне двигателя и промыть масляные фильтры (для двигателей, обкатываемых без применения централизованной системы подачи смазки).

3. Технические требования к горячей приработке

3.1. Перед началом горячей приработки следует убедиться в исправности двигателя, наличии топлива, охлаждающей жидкости и масла в соответствующих системах.

3.2. Перед началом горячей приработки необходимо проверить установку угла опережения впрыска топлива, а также прокачать систему питания двигателя ручным топливоподкачивающим насосом до полного заполнения системы.

3.1. При горячей приработке температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя должна поддерживаться в пределах 75–95 °С, масла в картере двигателя или на выходе из двигателя – в пределах 80–100 °С.

3.2. При работе двигателя не допускаются резкие стуки и шумы, выделяющиеся из общего шума работы двигателя и не характерные для нормальной работы двигателя в данном тепловом режиме.

3.3. Выбрасывание или течь масла, воды, топлива, а также прорыв газов в местах соединения не допускаются. Допускаются «потение», образование масляных пятен в местах манжетных уплотнений без каплеобразования при любых режимах работы двигателя; выделение масла и конденсата через отводящую трубу системы вентиляции картера в количестве не более 2 капель в минуту при 2100 мин^{-1} ; выделение воды, смазки или смеси воды и смазки из дренажного отверстия водяного насоса, при любых режимах работы, а также при остановке двигателя (1 капля в 3 мин); выделение отдельных капель топливомасляной смеси из выпускных коллекторов, течь топлива из дренажных трубок в виде отдельных капель.

3.4. В случае если двигатель при переходе на очередной этап не воспринимает нагрузку, следует повторить приработку на предыдущем этапе. Если и после этого двигатель не развивает требуемой мощности, приработку следует прекратить до выявления и устранения дефектов.

3.5. При работе двигателя на стенде не допускается резкое изменение нагрузок и частоты вращения коленчатого вала. Время снижения нагрузки и частоты вращения от наибольших значений до наименьших должно быть не менее двух минут.

4. Регулировка двигателя

4.1. Регулировка теплового зазора в клапанном механизме.

1) Тепловые зазоры в клапанном механизме следует проверять и, при необходимости, регулировать перед началом и по окончании приработки, но не ранее чем через 15 мин после остановки двигателя. Перед регулировкой необходимо выключить подачу топлива, скобой регулятора, снять крышки головок цилиндров и проверить затяжку болтов крепления осей коромысел моментом 118...147 Нж (12...15 кгсж).

2) При регулировке зазоров и повторной проверке их коромысла необходимо прижать:

а) на головке правого ряда цилиндров: выпускных клапанов – к торцу оси; впускных клапанов – к стопорному кольцу;

б) на головке левого ряда цилиндров: выпускных клапанов – к стопорному кольцу; впускных клапанов – к торцу оси.

Выпускные клапаны правого ряда цилиндров расположены ближе к вентилятору, левого ряда цилиндров - наоборот.

3) Для регулировки зазора необходимо ослабить контргайку регулировочного винта, вставить в зазор щуп и, вращая винт отверткой, установить зазор в пределах 0,25...0,30 мм. Придерживая винт отверткой, затянуть контргайку и проверить величину зазора. Щуп толщиной 0,25 мм должен входить свободно, а толщиной 0,30 мм – с усилием.

При прокручивании коленчатого вала двигателя после регулировки клапанов, из-за возможного биения сопрягаемых деталей газораспределительного механизма, допускается изменение теплового зазора в пределах 0,20...0,40 мм.

4) Регулировка зазора в клапанном механизме двигателя мод. 236М обусловлена порядком работы цилиндров 1-4-2-5-3-6 и должна производиться в следующей последовательности.

Вращая коленчатый вал по часовой стрелке (со стороны вентилятора) специальным ключом за болт крепления шкива и наблюдая за движением впускного клапана первого цилиндра, установить момент, когда он полностью поднимется (т. е. полностью закроется), после чего повернуть вал в указанном направлении до совмещения риски на шкиве привода водяного насоса с меткой 1–4 ЯМЗ-236М на лимбе.

В это время в первом цилиндре происходит такт сжатия и оба клапана этого цилиндра закрыты.

Проверить щупом и при необходимости отрегулировать зазоры между носками коромысел и торцами впускных и выпускных клапанов первого и четвертого цилиндров.

Последовательно совмещая на такте сжатия, в порядке работы цилиндров, риску на шкиве с метками 2–5 ЯМЗ-236М, проверить и отрегулировать тепловые зазоры впускных и выпускных клапанов соответствующих цилиндров.

4.2. Регулировка угла опережения впрыска топлива

1) Если на топливном насосе высокого давления отсутствует указатель установки угла опережения впрыска топлива следует производить по моментоскопу в следующей последовательности.

Установить моментоскоп на штуцер первой секции топливного насоса высокого давления. Прокачать топливом систему питания двигателя с помощью ручного подкачивающего насоса.

Вращать коленчатый вал по часовой стрелке (если смотреть со стороны вентилятора) до появления топлива в стеклянной трубке моментоскопа. Вылить излишки из стеклянной трубки.

Проверить коленчатый вал против хода на 45...60°.

Медленно проворачивая коленчатый вал по часовой стрелке, внимательно следить за уровнем топлива в стеклянной трубке и прекратить движение вала в момент начала движения топлива в трубке.

В этот момент риски на шкиве коленчатого вала должны находиться против риски, соответствующей установочному углу на крышке шестерен распределения или аналогичной риске на маховике, а также гасителе крутильных колебаний (для двигателей мод. 240) должны совпадать с соответствующими указателями на карте маховика и передней крышке блока цилиндров.

Если риски не совместились, нужно ослабить болты крепления ведущей полумуфты привода ТНВД и, придерживая автоматическую муфту опережения впрыска в положении начала подачи топлива, провернуть коленчатый вал до совпадения меток. В этом положении затянуть болты крепления полумуфты и вновь проверить установку угла опережения впрыска.

Если метки совпали с указателями раньше, чем начал движение уровень топлива в трубке моментоскопа, нужно продолжить проворот вала до момента начала движения топлива в трубке, затем ослабить болты полумуфты привода насоса, удерживая автоматическую муфту опережения впрыска в положении начала подачи, повернуть коленчатый вал обратно на 15...20°. После этого вал вновь вращать по часовой стрелке до совмещения меток и затянуть болты. Проверить установку угла опережения впрыска.

4.3 Регулировка минимальной частоты вращения коленчатого вала на холостом ходу.

1) Регулировку необходимо производить в следующей последовательности:

Ослабить контргайку и вывернуть из корпуса регулятора частоты вращения корпус буферной пружины на 2...3 мм.

Вывернуть болт ограничения минимальной частоты вращения холостого хода (рычаг управления должен упираться в этот болт), уменьшая частоту вращения коленчатого вала до появления неустойчивой частоты вращения.

Ввернуть корпус буферной пружины до исчезновения неустойчивости частоты вращения (при этом наружный торец корпуса буферной пружины не должен доходить до совмещения с торцом контргайки).

Закрепить болт регулировки минимальной частоты вращения холостого хода и корпус буферной пружины гайками.

2) Минимальная частота вращения холостого хода должна быть в пределах 550...650 мин⁻¹. Двигатель должен устойчиво работать в режиме холостого хода.

3) Для проверки устойчивости минимальной частоты вращения холостого хода следует увеличить частоту вращения коленчатого вала двигателя до 1200... 1300 мин⁻¹ и после чего резко сбросить рычаг управления регулятором до упора в болт регулировки минимальной частоты вращения. При этом двигатель не должен заглохнуть.

5. Устранение неисправностей

5.1. Мелкие неисправности (подтекание топлива или масла в местах соединений трубопроводов, подсос воздуха и др.), не требующие разборки двигателя, допускается устранять на стенде.

5.2. Не допускается производить на стенде замену следующих деталей: блока цилиндров, картера маховика, шестерен распределения, деталей поршневой группы, коленчатого вала, распределительного вала, толкателей, осей толкателей, гильз цилиндров, впускных и выпускных клапанов, поломавшихся и не извлеченных из двигателя деталей.

Не допускается устранять на стенде тугое проворачивание коленчатого вала. При мощности механических потерь более 11,3 кВт в начале обкатки при частоте вращения коленвала 500 мин⁻¹ (момент сопротивления прокручиванию более 30 кгс) двигатель отключается на устранение дефектов.

5.3. При обнаружении в поддоне посторонних металлических предметов или при наличии поломавшихся деталей, частицы которых не найдены, двигатель должен подвергаться полной переборке.

5.4. После устранения дефектов, связанных с заменой блока цилиндров, коленчатого вала, распределительного вала, одного или нескольких поршней или гильз, более половины вкладышей коренных или шатунных подшипников, а также более двух поршневых колец, стендовую приработку следует повторить полностью по основному режиму (холодная и горячая приработка, согласно табл. 1.1).

5.5. После устранения дефектов, связанных с заменой менее половины вкладышей коренных или шатунных подшипников или по одному поршневому кольцу не более чем в двух цилиндрах, повторная приработка двигателя должна производиться только по режиму горячей приработки.

5.6. При замене головки цилиндров или других деталей, замена которых требует снятия головки цилиндров, а также после замены масляного, водяного или топливного насоса, привода топливного насоса, шестерен распределения, манжеты коленчатого вала, картера маховика или крышки шестерен распределения, повторная приработка двигателя должна производиться по следующим режимам:

1) основному (холодная и горячая приработка), если замена произведена во время холодной приработки;

2) горячей приработки, если замена произведена во время горячей приработки;

3) повторной приработки (табл. 1.2), если замена произведена в процессе приемо-сдаточных испытаний.

5.7. При замене привода вентилятора, одной или нескольких штанг толкателей, коромысел, пружин клапанов, осей коромысел, впускных и выпускных коллекторов, водяных труб, форсунок, пробок, прокладок и устранения других мелких дефектов повторная приработка должна производиться по следующим режимам:

1) начиная с этапа, на котором производилась замена, если замена произведена во время основного режима;

2) если замена произведена во время приемо-сдаточных испытаний, технический контроль ремонтного предприятия должен проверить замененные детали и возобновить приемку.

Таблица 1.2

Режимы повторной приработки

Стадия приработки или контрольная операция	Этап	Частота вращения коленчатого вала мин	Нагрузка		Продолжительность, мин	
			расчетная, кВт (л. с.)	По шкале весового механизма да Н (кгс)	этапа	стадии или операции
Горячая без нагрузки	1	1200–1300	-	-	5	5
Горячая под нагрузкой	2	1600–1700	44 (60)	36–37,5	10	25
	3	1700–1800	66 (90)	50–53	5	
	4	1800–1900	88 (120)	63–66,5	5	
	5	1900–2000	103 (140)	70–73	5	
ИТОГО:						30

6. Приемо-сдаточные испытания

6.1. По окончании приработки каждый отремонтированный двигатель должен пройти испытания в соответствии с режимами приемо-сдаточных испытаний, приведенными в табл. 1.1.

Двигатели должны предъявляться к сдаче после прогрева и регулировки. Централизованную систему подачи масла при приемо-сдаточных испытаниях рекомендуется не применять.

6.2. При приемке двигателя должна быть проверена его комплектность, качество сборки, давление масла, развиваемая мощность, расход топлива, регулировка угла опережения впрыска топлива, минимальная и максимальная частоты вращения коленчатого вала на холостом режиме, отсутствие повышенных шумов и стуков, герметичность систем смазки, охлаждения, питания и выпуска газов, работа компрессора, генератора, стартера, сцепления.

6.3. Давление масла в системе смазки при температуре масла плюс 80...95 °С должно быть: при частоте вращения коленчатого вала 2100 мин⁻¹ в пределах 500...700 кПа (5...7 кгс/см²); при минимальной частоте вращения холостого хода - не менее 100 кПа (1 кгс/см²).

6.4. Мощность, развиваемая двигателем, должна быть не менее приведенной в табл. 1.1.

После приемки двигателя следует произвести ограничение мощности на обкаточный период винтом – ограничителем (при ввертывании винта – мощность двигателя уменьшается, при вывертывании – увеличивается).

Мощность двигателей при 2100 мин⁻¹ коленчатого вала должна быть ограничена для двигателя ЯМЗ-236М до значений (110 ±4) кВт (150 ± 5) л. с.

После регулировки опломбировать винт ограничения мощности.

6.5. Часовой расход топлива не должен превышать величины, указанной в табл. 1.1. Проверять 1 % двигателей, но не менее одного двигателя в месяц.

6.6. Угол опережения впрыска топлива должен быть для двигателей ЯМЗ-236М – 20±1.

6.7. Минимальная и максимальная частоты вращения коленчатого вала на режиме холостого хода не должны превышать величин, указанных в табл. 1.1.

Двигатель должен легко запускаться и четко останавливаться при прекращении подачи топлива.

6.8. Требования к отсутствию повышенных шумов и стуков, а также к герметичности систем двигателя должны соответствовать приведенным в п. п. 3.2 и 3.3.

7. Правила приемки ОТК и методы контроля:

7.1. Все отремонтированные двигатели после приработки и испытаний должны быть проверены и приняты отделом технического контроля ремонтного предприятия.

7.2. Проверка внешнего вида двигателя, качество его сборки и комплектности должны производиться внешним осмотром.

7.3. Проверка угла опережения впрыска топлива должна производиться по меткам на корпусе топливного насоса и муфте опережения впрыска при положении поршня первого цилиндра в верхней мертвой точке.

7.4. Герметичность соединений системы смазки, питания, охлаждения и выпуска газов должна проверяться визуально.

8. Контрольный осмотр двигателей

8.1. Для проверки приработки деталей часть двигателей после окончания обкатки должна подвергаться контрольной переборке.

Переборке должны подвергаться только те двигатели, при испытании которых возникли подозрения на возможность появления дефектов и дополнительно каждый двадцатый двигатель.

8.2. Для проведения контрольного осмотра двигатель должен быть частично разобран в объеме, позволяющем осмотреть указанные ниже детали.

8.3. Требования к внешнему виду деталей, подлежащих осмотру при контрольной переборке двигателя.

1) Вкладыши коренных и шатунных подшипников.

Допускаются отдельные кольцевые риски глубиной не более 0,2 мм и засветления в виде пятен. Не допускаются задиры, трещины, выкрашивание, подплавление, грубые риски и забоины.

2) Полукольца упорного подшипника коленчатого вала.

Допускаются отдельные кольцевые риски глубиной не более 0,3 мм без прижогов и наволакивания металла. Не допускаются задиры, грубые риски и забоины.

3) Поршни.

Допускаются отдельные продольные риски на слое полуды и засветления этого слоя в виде блестящих полос при сохранении полуды.

Не допускаются подплавления полуды и задиры.

4) Поршневые кольца.

Кольца должны свободно перемещаться в канавках. Контакт приработки должен быть замкнут по окружности. Не допускаются выкрашивания, сколы колец и выплавление полуды.

5) Коленчатый вал.

Допускаются отдельные кольцевые риски на шейках. Не допускаются огранка, риски на галтелях, забоины и задиры на шейках.

6) Гильзы цилиндров.

Допускаются отдельные продольные риски на внутренних поверхностях. Не допускаются трещины, натиры, задиры, цвета побежалости.

7) Впускные и выпускные клапаны.

Допускаются засветления на верхнем торце в месте контакта с коромыслом, следы приработки и отдельные продольные риски стержней клапана, следы контакта с седлом головки цилиндров на рабочей фаске клапана, а также незначительная сыпь на рабочей фаске.

Не допускаются износы верхнего торца, задиры, забоины и риски на стержне клапана, а также значительные износы и сыпь на рабочей фаске.

8) Пружины клапанов.

Не допускаются засветления витков, вызванные касанием наружной пружины о внутреннюю.

9) Втулки коромысел клапанов.

Допускаются отдельные риски и следы приработки на внутренней поверхности. Не допускаются задиры, грубые риски и забоины.

10) Оси коромысел.

Допускаются отдельные засветления и следы бронзы в местах контакта с втулками коромысел. Не допускаются задиры, грубые риски и забоины, а также наволакивание бронзы с втулок коромысел.

11) Масляный насос.

Допускаются следы контакта с шестернями и риски на корпус и приставке масляного насоса.

Для более точной оценки состояния деталей при контрольном осмотре рекомендуется использование эталонов, утвержденных главным инженером ремонтного предприятия.

8.4. При сборке двигателя после контрольной переборки подлежат замене следующие детали:

1) кольцо Д4 142,7 ТУ 6-05-1988–85 при съеме прокладок цилиндров;

2) 236-1005128-А; 236-1005129-А и 240-1005128 – замковые пластины болтов крепления маховика.

3) шайбы крепления трубок масляного насоса к блоку;

4) прокладки из резины, картона, паронита.

8.5. После контрольной переборки без замены основных деталей двигатель должен подвергаться приработке по режиму повторной приработки (табл. 1.2) при замене основных деталей – в порядке, указанном в п. 5.5.

8.6. Нормы и методы определения дымности отработанных газов двигателя при стендовых испытаниях по ГОСТ 17.2.2.01.

При установке капитально отремонтированного двигателя на транспортное средство, по завершении обкатки двигателя в эксплуатации, при первом техническом обслуживании (ТО-I) после пробега 1000 км или 50 часов работы по ГОСТ 21393.

Перечень условных обозначений

- R_a – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм;
- $N_{мп}$ – мощность механических потерь, кВт;
- $N_{мптр}$ – мощность механических потерь на трение, кВт;
- $N_{нас}$ – мощность механических потерь на насосные ходы, кВт;
- $N_{пр}$ – мощность механических потерь на привод, кВт;
- $p_{мп.д}$ – среднее давление механических потерь дизеля, (Па);
- n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹;
- z – число цилиндров, шт.;
- V_h – рабочий объем цилиндра, м³;
- k_t – коэффициент тактности;
- $p_{мп.п}$ – среднее давление механических потерь поршня о гильзу, (Па);
- $p_{мп.к}$ – среднее давление механических потерь колец о гильзу, (Па);
- $p_{мп.ш.п}$ – среднее давление механических потерь в шатунных подшипниках, (Па);
- $p_{мп.к.п}$ – среднее давление механических потерь в коренных подшипниках, (Па);
- $p_{мп.з.п}$ – среднее давление механических потерь в зубчатых передачах, (Па);
- $p_{мп.в.м}$ – среднее давление механических потерь на привод механизмов, (Па);
- $p_{мп0}$ – среднее давление механических потерь на неучтенные потери, (Па);
- $f_{мпi}$ – коэффициент трения скольжения (безразмерный);
- $p_{дв.}$ – удельное движущее усилие, Па;
- $p_{ц}$ – избыточное давление газа, Па;
- p_j – давление сил инерции поступательно движущихся масс, Па;
- R_K – радиуса кривошипа, м;
- λ_n – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;
- α – угловое перемещение кривошипа, рад;
- $p_{ц\ ср}$ – осредненное значение избыточного давления газа, Па;

$p_{j\text{cp}}$ – осредненными значениями давления сил инерции, Па;
 p_a – давление в начале сжатия, Па;
 ε – действительная степень сжатия;
 ε_{Γ} – геометрическая степень сжатия;
 p_i – среднее индикаторное давление, Па;
 $p_{\text{карт}}$ – давление в картере, Па;
 n_1 – показатель политропы сжатия;
 $P_{j\text{cp}}$ – среднеинтегральное давление сил инерции, Па;
 m_{jn} – приведенная масса деталей, отнесенная к площади поршня, кг/м²;
 $h_{\text{тп}}$ – высота юбки поршня, м;
 $D_{\text{ц}}$ – диаметр цилиндра, м;
 S – ход поршня, м;
 $\eta_{\text{м.ст}}$ – динамическая вязкость масла для среднеинтегральной температуры, Па · мин.
 $p_{\text{Рк.к}}$ – радиальное давление, Па;
 $p_{\text{у.к}}$ – давление сил собственной упругости компрессионного кольца, Па;
 $z_{\text{к.к}}$ – число компрессионных колец, шт.;
 $p_{\text{вп.ср}}$ и $p_{\text{вып.ср}}$ – средние давления за ход впуска и выпуска, Па;
 $p_{\text{г.ср}}$ – среднее избыточное давление газа, Па;
 $h_{\text{к.к}}$ и $h_{\text{к.м}}$ – высота компрессионных и маслосъемных колец, м;
 $C_{\text{т}}$ – средняя скорость поршня, м/с;
 $C_{\text{т.кр}}$ – критическое значение средней скорости поршня, м/с;
 $z_{\text{к.м}}$ – число маслосъемных колец, шт.;
 $p_{\text{у.м}}$ – давление сил собственной упругости маслосъемного кольца, Па;
 $p_{j\text{сра}}$ – среднее давление от сил инерции поступательно движущихся масс, Па;
 $p_{\text{Р}}$ – давление от центробежных сил инерции, Па;

$P_{R_{ш}}$ – давление от центробежных сил инерции для шатунного подшипника, Па;

$P_{R_{ср}}$ – давление от центробежных сил инерции для коренного подшипника, Па;

ψ – угол заклинивания кривошипов, рад;

$m_{R_{ш}}$ – приведенные массы вращающихся частей шатуна, кг/м²;

m_R – приведенные массы вращающихся деталей кривошипа, кг/м²;

ω – угловая скорость, с⁻¹;

d_n и l_n – диаметр и длина подшипника, м;

R_K – радиуса кривошипа, м;

$\eta_{м.н}$ – динамическая вязкость масла при температуре подшипника, Па · мин;

$d_{ср}$ – средний диаметр подшипника;

$f_{тр.к}$ – коэффициент сопротивления качению (безразмерный);

T_m – температура масла, °С;

$P_{тр.н}$ – среднее давление механических потерь на привод насосов, (Па);

Q_n – производительность насоса, м³/мин;

n – частота вращения насоса, мин⁻¹;

Δp_n – перепад давления в насосе, Па;

η_n – коэффициент полезного действия (КПД) насоса;

\bar{v} – средняя скорость изменения мощности механических потерь, Вт/мин;

$N_{м0}$ – мощность механических потерь в начале обкатки, кВт;

$N_{мк}$ – мощность механических потерь в конце обкатки, кВт;

$t_{об}$ – время обкатки, мин;

$T_{м0}$ – температура масла в начале обкатки, °С;

N_T – тормозная мощность на стенде, кВт;

$M_{кр}$ – крутящий момент, Нжм;

$P_{Вес}$ – показание измерительного устройства стенда, Н;

P_e – среднее эффективное давление на горячей обкатке под нагрузкой, Па;

B_0 – коэффициент при свободном члене, кВт;

B_2 – коэффициент, учитывающий влияние средней скорости изменения мощности механических потерь, 10^3 мин;

B_3 – коэффициент, учитывающий влияние температуры масла, кВт/°С;

B_{12} – коэффициент, учитывающий влияние парного взаимодействия мощности механических потерь в начале обкатки и температуры масла, 1°С ;

$W_{\text{дв}}$ – акустическая мощность источника звука, Вт;

$\chi_{\text{люм}}$ – коэффициент, учитывающий влияние ближнего звукового поля;

Ω – угол, в котором происходит излучение;

$\tau_{\text{дв}}$ – расстояние от источника до стенки капота, м;

$\Psi_{\text{кап}}$ – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности в помещении;

$B_{\text{кап}}$ – постоянная капота, $B_{\text{кап}} = (S_{\text{кап}} \alpha_{\text{кап}}) / (1 - \alpha_{\text{кап}})$;

$S_{\text{кап}}$ – площадь поверхности капота, м^2 ;

$\alpha_{\text{кап}}$ – средний коэффициент поглощения под капотом;

$t_{\text{кап}}$ – звукопроводность элементов капота;

$S_{\text{кап},i}$ – площадь элементов капота, м^2 ;

n – число элементов ограждения капота;

V – объем помещения, м^3 ;

$I_{\text{пр}}$ – составляющая прямого звука, Вт/м;

$I_{\text{отр}}$ – составляющая отраженного звука, Вт/м;

W – акустическая мощность источника, Вт;

ϵ – коэффициент, учитывающий влияние ближнего звукового поля источника;

j – фактор направленности источника;

r – расстояние от источника до расчетной точки, м;

L – уровень звукового давления, дБ;

L_w – уровень звуковой мощности источника, дБ.

m – коэффициент, учитывающий нарушение диффузности звукового поля в помещении;

$V_{\text{п}}$ – постоянная помещения, м².
 a_i – частотно зависимый коэффициент звукопоглощения i -го ограждающего элемента;
 S_i – площадь соответствующей ограждающей конструкции, м²;
 $S_{\text{пом}}$ – суммарная площадь ограждающих поверхностей помещения, м²;
 $f_{\text{гр}}$ – граничная частота волнового совпадения, определяемая соотношением:
 p – среднеквадратическое значение звукового давления, Па;
 p_0 – исходное значение звукового давления, в воздухе $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Па;
 S – площадь измерительной поверхности, м²;
 A – эквивалентная площадь звукопоглощения в помещении, м²;
 L_{pi} – уровень звукового давления измеренный в i -й точке измерения, дБА;
 N – число точек;
 \bar{L}_i – среднеарифметическое значение уровня звукового давления в i -й октавной полосе частот для n объектов, дБ;
 \bar{L}_{ni} – значение уровня звукового давления в i -й октавной полосе частот для каждого из n объектов, дБ; n – исходное число объектов;
 S_i – среднеквадратическое отклонение уровня звукового давления в i -й октавной полосе частот для n объектов, дБ; L_v – уровни виброскорости, дБ;
 L_w – уровни виброускорения, дБ;
 f – среднегеометрические частоты, Гц;
 L_i – средний квадратичный уровень звукового давления в октавных полосах частот, дБА;
 L_k – корректированная характеристика по шкале А, дБА.

Научное издание

Андруш Виталий Григорьевич,
Евтух Андрей Константинович,
Карпович Станислав Константинович и др.

МИНИМИЗАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОПАСНОСТЕЙ
ПРИ СТЕНДОВОЙ ОБКАТКЕ АВТОТРАКТОРНЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*
Редактор *Г. В. Анисимова*
Корректор *Г. В. Анисимова*
Компьютерная верстка *Д. А. Пекарского*
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 25.08.2020. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 15,11. Уч.-изд. л. 11,81. Тираж 100 экз. Заказ 342.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№1/359 от 09.06.2014.
№2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99-2, 220023, Минск.