

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХ-
НИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МАДИ»

На правах рукописи

Строганов Владимир Иванович

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И АВТОМОБИЛЕЙ
С КОМБИНИРОВАННОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация
на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук,
профессор Ютт В. Е.

Москва – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
Глава 1. Концепции проекто-технологического развития электромобилей и автомобилей с комбинированной (гибридной) энергоустановкой	13
1.1 Электромобили и автомобили с комбинированной энергоустановкой. Этапы развития.....	13
1.2 Актуализация проблемы обеспечения экологических норм на автомобильном транспорте.....	18
1.3 Ключевые аспекты изменений в автомобильной промышленности в контексте развития электрических технологий.....	29
1.4 Новые технологии автомобилестроения.....	31
1.5 Проблемы, влияющие на потребительский спрос электромобилей и автомобилей с КЭУ.....	34
1.6 Проблемы безопасности перспективных транспортных средств.....	36
1.7 Основные проектные решения для электромобилей и автомобилей с КЭУ.....	38
1.8 Проблемные области технологий проектирования и производства ТАБ электромобилей и автомобилей с КЭУ.....	39
1.9 Проблемные области технологий проектирования и производства тяговых электродвигателей для электромобилей и автомобилей с КЭУ.....	45
1.10 Ресурсное обеспечение производства и эксплуатации электромобилей и автомобилей с КЭУ.....	56
1.11 Перспективы развития рынка электромобилей и автомобилей с КЭУ.....	64
1.12 Выводы по главе.....	66
Глава 2. Моделирование основных энергетических процессов в тяговых электроприводах электромобилей и автомобилей с КЭУ.....	69
2.1 Общие уравнения циклического движения автомобиля.....	69
2.2 Методика построения топограмм - многопараметровых характери-	

стик двигателя внутреннего сгорания.....	88
2.3 Моделирование энергоемких накопителей гибридной энергоустановки.....	94
2.4 Исследование и моделирование бортовых электросиловых накопителей.....	100
2.5 Выводы по главе.....	105
Глава 3. Математическое моделирование силовых электроприводов ЭМБ и АКЭУ.....	107
3.1 Актуализация задачи моделирования электроприводов ЭМБ и АКЭУ.....	107
3.2 Оптимизация управляющих воздействий по методу векторно-токовой оптимизации.....	109
3.2.1 Управление асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором.....	111
3.2.2 Управление синхронной машиной с электромагнитным возбуждением.....	119
3.2.3 Управление машиной постоянного тока с независимым возбуждением.....	123
3.2.4 Математическое моделирование вентильных электромеханических преобразователей с магнитоэлектрическим возбуждением.....	128
3.2.5 Имитационное моделирование ЭМП с постоянными магнитами.....	135
3.2.6 Численное моделирование электромагнитных процессов ЭМП с ПМ в осях dq	142
3.3 Выбор алгоритмов управления для тягового привода на основе асинхронного двигателя.....	146
3.4 Управление асинхронным двигателем. Бездатчиковый привод.....	158
3.5 Выводы по главе.....	198

Глава 4. Имитационное моделирование и реализация электронных систем управления автомобилями с КЭУ.....	198
4.1 Проблема разработки системы регулирования скорости движения АКЭУ.....	198
4.2 Имитационная модель системы регулирования скорости.....	199
4.3 Реализация электронной системы регулирования скорости движения АКЭУ в режимах поддержания и ограничения скорости.....	216
4.4 Моделирование и реализация системы изменения фаз газораспределения (VVT) автомобилей с КЭУ.....	224
4.5 Моделирование и реализация электронной системы управления «Старт – Стоп» АКЭУ.....	230
4.6 Выводы по главе.....	239
Глава 5. Методы комплексного анализа качества и надежности. Концепция повышения эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ.....	241
5.1 Традиционные модели расчета показателей качества АТС в эксплуатации.....	241
5.2 Перспективные модели расчета показателей качества ЭМБ и АКЭУ.....	248
5.3 Комплексы анкетных исследований воспринимаемого качества автомобилей в эксплуатации.....	256
5.4 Проблема стратегического планирования улучшения качества и надежности комплекса электрооборудования ЭМБ и АКЭУ.....	270
5.5 Концепция повышения эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ на этапах жизненного цикла.....	276
5.6 Метод стратегического планирования качества и надежности ЭМБ и АКЭУ.....	286
5.7 Выводы по главе.....	288
Глава 6. Комплекс программных инструментов анализа и прогнозирования эффективности мероприятий, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ.....	290

6.1 Оценка эффективности мероприятий направленных на повышение надежности ЭМБ и АКЭУ	290
6.2 Оценка эффективности повышения надежности ЭМБ и АКЭУ с учетом изменения цены и удовлетворенности потребителей.....	298
6.3 Полиномиальные модели в оптимизации комплексных показателей надежности комплекса электрооборудования ЭМБ и АКЭУ	308
6.4 Прогнозирование эффективности мероприятий по улучшению комплексных показателей надежности в производстве.....	312
6.5 Прогнозирование эффективности мероприятий по улучшению комплексных показателей надежности по сложным рекламациям. Система организации индивидуального отзыва ЭМБ и АКЭУ	313
6.6 Комплексное прогнозирование показателей ремонтпригодности ЭМБ и АКЭУ	321
6.7 Выводы по главе.....	325
Заключение.....	326
Библиографический список.....	329
Приложения.....	351

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования.

Анализ развития мирового автомобильного рынка показывает, что сегодня электромобили (ЭМБ) и автомобили с комбинированными (гибридными) энергоустановками (АКЭУ) становятся серьезной альтернативой для потребителей в принятии решения при покупке новых автомобилей. Экспертное сообщество едино во мнении, что электрические технологии становятся доминирующим фактором, обеспечивающим улучшение эксплуатационной эффективности транспортных средств (ТС). При этом ключевые аспекты изменений в контексте развития автомобилей представляют собой направления несущие серьезные изменения для традиционной автомобильной промышленности, ее конструкторской и технологической базы.

Большой вклад в развитие теории автомобильного электрооборудования внесли российские и зарубежные ученые: С.В. Акимов, В.А. Балагуров, В.В. Болотин, С.Я. Дунаевский, Е.В. Кононенко, И.П. Копылов, Ю.А. Купеев, А.В. Лоос, Б.И. Петленко, Г.А. Сипайлов, И.И. Трещев, М.Н. Фесенко, А.Е. Чернов, Эйдинов А.А., В.Е. Ютт, W. Kellenberger, J. Kozesnik, A. Krapel, G. Langkabel, G. Pfeifer, A.W. Robinson, I. Szabo, G. Torges, E. Wiedemann и др., в работах которых заложены основы анализа и синтеза автомобилей с комбинированной энергоустановкой и электромобилей.

Однако существует ряд нерешенных теоретических и практических проблем, которые не позволяют в настоящее время ЭМБ и АКЭУ конкурировать в большинстве случаев с автомобилями, оснащенными традиционной силовой установкой.

Важное значение, для успешного внедрения электромобилей и автомобилей с КЭУ, приобретает взаимосвязь между наборами проектных технологий и комплексов обеспечения эксплуатационной эффективности базирующихся на показателях качества и надежности. Решение этих организационно-экономических проблем невозможно без решения технических задач, связанных с эффективным на-

коплением электрической энергии, совершенствованием энергоэффективности привода колес, реализации оптимальных алгоритмов управления системами ЭМБ и АКЭУ.

Специфика проектирования и производства ЭМБ и АКЭУ подразумевает необходимость разработки нового комплекса инструментов обеспечивающего требуемый уровень эксплуатационной эффективности. Несомненно, что отправной точкой в реализации данной задачи является использование прогрессивных технологий управления качеством и надежностью сложившихся при проектировании и производстве компонентов системы электрооборудования традиционных автомобилей на основе стандарта ISO/TS 16949. При этом необходимо учитывать и инфраструктурные изменения, носителями которых являются новые требования по обеспечению соответствующих характеристик электромобилей и АКЭУ.

Объект исследования – комплекс электрооборудования электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой.

Цель и основные задачи исследования

Целью настоящей работы является создание системы научно-практических инструментов и средств, направленных на повышение эксплуатационной эффективности ЭМБ и АКЭУ.

В соответствии с поставленной целью в диссертации решаются основные задачи:

1. Анализ основных проблем и определение тенденций проектно-технологического развития ЭМБ и АКЭУ, с учетом вопросов повышения эксплуатационных характеристик.

2. Формирование комплекса математических моделей:

- обеспечивающих систематизацию, в рамках единого комплекса, уравнений движения, тягового, мощностного и энергетического балансов фаз циклического движения ЭМБ и АКЭУ в городском режиме;

- определяющих процессы в бортовых электросиловых накопителях энергии для ЭМБ и АКЭУ, с использованием имитационных и математических

структур для повышения эффективности решения задач связанных с выбором и оптимальным использованием тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ);

- тягового и генераторного режимов работы бортовых электрических машин и системы управления, с учетом предельного использования по мощности во всем диапазоне возможных скоростей и нагрузок с минимально возможными для каждого режима работы потерями;

3. Имитационного моделирования электронных систем управления режимами движения ЭМБ и АКЭУ, с целью обеспечения эксплуатационной эффективности транспортного средства.

4. Разработка системы аналитических инструментов и средств мониторинга, прогнозирования и обеспечения надежности комплекса электрооборудования, в рамках концепции повышения эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ.

Методы исследования

Исследования проведены с использованием фундаментальных основ теории двигателей внутреннего сгорания и электрических машин, методов дифференциального и интегрального исчислений, структурного моделирования, численных методов аппроксимации, теории оптимизационного проектирования и физического моделирования. Для решения задач численного моделирования переходных процессов применялись программные пакеты SIMULINK пакета MATLAB 7.02.

Экспериментальные исследования проводились на основе:

- исследования причин отказов системы электрооборудования и организации кампаний по индивидуальному отзыву автомобилей из эксплуатации, производства мировых лидеров автопрома;
- определения многопараметрических характеристик комбинированной энергоустановки (КЭУ) из экспериментальных нагрузочных характеристик типового двигателя внутреннего сгорания ВАЗ-1111;
- анализа погрешностей полученных математических моделей ТАБ в сравнении с экспериментальными разрядными характеристиками и удельными

техническими параметрами свинцово-кислотной ТАБ «Оптима».

Научная новизна

Разработана концепция повышения эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ, включающая:

- математическую модель (ММ) циклического движения автомобиля с КЭУ, функционально ориентированную на моделирование городского цикла движения ТС с учетом замедления и торможения с рекуперацией энергии;
- ММ энергоемких накопителей гибридных энергоустановок, учитывающая, в отличие от известных моделей, интенсивность токов разрядки (малых, средних и больших) и позволяющая с высокой точностью рассчитывать остаточный заряд батареи;
- оптимизацию управляющих воздействий на электропривод колес, позволяющую обеспечивать заданный режим движения при минимальном для этого режима уровне потерь в электродвигателе;
- имитационные модели электронных систем управления движением ЭМБ и АКЭУ и их реализацию в виде принципиальных схем, учитывающие сопряжение алгоритмов управления систем двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электроприводов, с целью повышения комфортности и экономичности движения ТС;
- комплекс аналитических моделей мониторинга и прогнозирования надежности, а также инструментов измерения эффективности проектно-технологических мероприятий по повышению эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ.

Практическая ценность и реализация результатов

Совокупность научных положений, идей и практических результатов исследований составляют новое направление в области теоретических и практических методов анализа и решения проблемы повышения эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ.

Разработаны и внедрены в практику деятельности предприятий автомо-

бильной отрасли:

1. Программы аналитической оценки качества комплекса электрооборудования ЭМБ и АКЭУ на эксплуатационном этапе жизненного цикла, позволяющие проводить анализ проблем, исходя из реализации оценки надежности через данные исследования потребительской удовлетворенности и регистрации отказов на предприятиях автосервиса.

2. Алгоритмы и программы прогнозирования эффективности мероприятий по повышению эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ.

Результаты диссертационной работы в виде математических и имитационных моделей работы системы тягового электропривода применены в ОАО «АВТОВАЗ» при оценке эксплуатационных характеристик разрабатываемых автомобилей с комбинированной энергетической установкой на базе семейства LADA “Granta”.

Разработанные методы и рекомендации прошли апробацию и внедрены в практику деятельности ООО «БИЗНЕС-КОНСАЛТ», НПП ИТЕЛМА, г. Москва, консалтингового центра «Качество = XXI век», а также производителя электронных автомобильных компонентов ООО «ШТАТ».

Использование и апробация результатов диссертационной работы подтверждены актами внедрения результатов (Приложения А, Б, В, Г, Д).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель циклического движения автомобиля с КЭУ, функционально ориентированная на моделирование городского цикла движения ТС с учетом замедления и торможения с рекуперацией энергии.
2. Математическая модель энергоемких накопителей гибридных энергоустановок, учитывающая интенсивность токов разрядки (малых, средних и больших) и позволяющая с высокой точностью рассчитывать остаточный заряд батареи.
3. Векторно-токовая оптимизация управляющих воздействий на электропривод колес, обеспечивающая заданный режим движения при минимальном для этого режима уровне потерь в электродвигателе.

4. Комплекс имитационных моделей электронных систем управления движением транспортного средства с гибридной силовой установкой, учитывающий сопряжение алгоритмов управления систем двигателя внутреннего сгорания и электроприводов, с целью повышения комфортности и экономичности движения ТС.
5. Математические модели и программные комплексы, реализующие аналитическую оценку и прогнозирование эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ.

Достоверность научных положений

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются правомочностью принятых исходных допущений и предпосылок, корректным применением методов исследования, применением классических методов теории электрических машин, статистической обработки данных, а также практической реализацией и экспериментальными исследованиями разработанных систем и моделей.

Достоверность положений и выводов диссертации подтверждена положительными результатами внедрения работы в организациях занимающихся разработкой, производством и обслуживанием легковых автомобилей.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на методических и научно-исследовательских конференциях Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета в 2006 – 2014гг.

Основные положения и результаты работы докладывались на международных конференциях: «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки кадров» (Москва, 2000, 2001 г.); «Технический вуз - наука, образование и производство в регионе» (Тольятти, 2001); «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров» (Москва, 2002г.); «Синергетика природных, технических и социально-экономических систем» (Тольятти 2012 г.); «Наука – промышленности и сервису»

(Тольятти, 2012 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 монографии, 53 печатных работы общим объемом 42,3 п.л. из них 24 работы в изданиях входящих в перечень ВАК, а также 5 работ в журналах с международным индексом цитирования.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертации 356 стр. компьютерного набора, 127 рисунков, 34 таблицы.

ГЛАВА 1. КОНЦЕПЦИИ ПРОЕКТО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И АВТОМОБИЛЕЙ С КОМБИНИРОВАННОЙ (ГИБРИД- НОЙ) ЭНЕРГОУСТАНОВКОЙ

1.1 Электромобили и автомобили с комбинированной энергоустановкой.

Этапы развития

История развития проектов электромобилей начинается в 1835 году, когда профессор Страйтинг продемонстрировал небольшой электрический автомобиль в городе Гронинген (Нидерланды). Автомобиль, по сути, представлял собой концептуальную модель, в которой было необходимо решить множество перспективных задач связанных, например, с обеспечением хранения электроэнергии. Данная задача была решена с помощью разработки свинцово-кислотной аккумуляторной батареи (ТАБ), бельгийским ученым Гастоном Планте в 1859 году. А в совокупности, с разработанной Жэнобе Теофилом Граммом более совершенной конструкции тягового электродвигателя полученный комплекс охватывающий тяговую аккумуляторную батарею (ТАБ) – тяговый электродвигатель, сформировал предпосылки для развития процессов проектирования и производства электромобилей [156].

Примерно в 1870 году братья Сименс запатентовали двойные Т-образные железно-арматурные генераторы в Англии, и в 1890-х годах француз Г. Трове использовал пару модифицированных двигателей Сименс и батарею Планте в мотоцикле с коляской, который развивал скорость до 12 км/час. Похожие мотоциклы появились в США и Великобритании, и к 1896 году партнеры Моррис и Салом произвели 13 электрических автомобилей, которые работали в Нью-Йоркском такси, с циклом пробега до полной разрядки ТАБ - 48 км.

К концу 1890-х годов на автомобильном рынке появились более высокотехнологичные двигатели внутреннего сгорания (ДВС), которые напрямую конкурировали с электроприводами. Начался этап соперничества технологий. Уже в 1896 году испанским инженером Г. Хульеном была разработана батарея с цинковыми

пластинами в щелочном электролите, конструкция которой актуальна и сегодня. А в 1897 Дараком был построен электромобиль, имеющий достаточно высокие показатели энергосбережения. В этот период времени в Великобритании наблюдается всплеск интереса к электромобилям, которые использовались, например, в такси. Благодаря чему в 1897 г. в Лондоне была создана ассоциация «Red Flag Act (Красный Флаг Закона)», и к лету 1897 года, 15 электромобилей уже работали в Лондоне.

Важным достижением электромобилестроения являются технологии французского изобретателя Ками Женази, благодаря которым был достигнут рекорд скорости на электромобиле – 98 км/ч, полученный в 1899 году. Фердинанд Порше создал первый Lohner-Wagen в 1900 году с электродвигателями на передней ступице колес, а уже в следующем году, был разработан Lohner-Porsche Rennwagen с батареями общей массой 1800 кг и питанием электропривода в 1,5 кВт. Он также создал первую модель автомобиля с комбинированной энергоустановкой – MixtWagen, в которой использовал бензиновый двигатель для привода генератора, с которого электроэнергия снималась ТАБ питающей электропривод транспортного средства.

До первой мировой войны в США и Великобритании эксплуатировалось порядка 30 тыс. электромобилей. Автомобилей с ДВС в этот период времени было уже не менее 900 тыс.

Причиной бурного роста технологий проектирования и производства автомобилей с ДВС множество. В 1908 г. Генри Форд запустил «Model T», что обозначило век массового производства автомобилей с низкой себестоимостью. В этот период в Техасе и на Ближнем Востоке были обнаружены обширные залежи нефти. В 1911 году Чарльз Кеттеринг, внедрил электрический стартер на Cadillac, из-за чего исчез ручной пуск. По большей части приведенные факторы способствовали снижению инженерной активности в вопросах создания электромобилей, и уже к 1935 году соответствующие технологии не обновлялись. Однако были и исключения: после Второй мировой войны в Японии был небольшой процент электромобилей, а в Великобритании некоторое количество электромобилей обеспечи-

вало решение транспортных задач городского сервиса.

В 60-х годах 20 века, проблема развития экологичного транспорта вновь стала актуальной. Электромобили стали рассматриваться как потенциально необходимые транспортные средства. Так, в связи с ростом количества автомобилей эксплуатируемых в штате Калифорния (США) в 1966 г. президентом Никсоном был подписан первый пакет законов, который определял экологические требования к автомобильному транспорту. В 1970 г. в США была сформирована служба по охране окружающей среды (EPA).

Первые попытки возрождения проектов электромобилей были реализованы в виде глубоких инженерных изменений стандартных автомобильных платформ. Например: электромобиль Иллинойс (Illinois-based) корпорации Eureka Williams; электромобиль Enfield производства Центральной Электропроизводящей компании Англии. Enfield имел массу 975 кг и мог развивать скорость до 64 км/ч, при пробеге до полной разрядки ТАБ - 90 км. Тем не менее, стоимость такого электромобиля в 2 раза превышала стоимость аналогичного автомобиля с ДВС. В 1967 г. компания Ford в Великобритании представила электромобиль Comuta, с заявленным циклом пробега до перезарядки равным 64 км, при обеспечении средней скорости движения – 40 км/час. В этот же период в США, компания GM запустила проект создания электромобиля на базе модели Corvair, оцененный в 15 млн. долл. Сначала в качестве основного накопителя энергии использовалась цинк-воздушная ТАБ, а уже во второй итерации автомобилей данной марки использовалась серебряная батарея с примесью цинка, расположенная в переднем и заднем отсеках салона автомобиля. Серебряные батареи с цинком были использованы потому, что они обладали высокой мощностью в пиковых режимах и обеспечивали достаточный уровень сохранения энергии, но в то же время были дорогими, а характеристики надежности и стабильности работы резко ухудшались уже после 100 циклов перезарядки. Пробег электромобилей до полного разряда ТАБ был ограничен 129 км, а бензиновая версия автомобиля обеспечивала движение на расстояние в 480 км. В Европе GM электрифицировала Opel Kadette на приводе двигателя постоянного тока с использованием как свинцово-кислотных, так и воз-

душно-цинковых батарей. В последнем варианте компания заявляла повышенный пробег между подзарядками – 240 км при средней скорости движения 48 км/ч [209].

В 1970 году, Генеральная Электрическая компания показала электромобиль GE Delta, в котором была использована комбинация свинцово-кислотных и никель-кадмиевых аккумуляторов.

Однако главными проблемами электромобилей оставались не высокая энергоэффективность, а значительная стоимость и слабая динамика движения.

В 1972 г. компания Sebring-Vanguard, основанная в штате Флорида (США), запустила на рынок двухместный Citicar: электромобиль особо малого класса с максимальной скоростью движения 72 км/ч и пробегом между перезарядкой ТАБ – 40 км. В течение следующих четырех лет компания продала 2500 машин стоимостью 3000 долл. США.

Одним из лидеров в области разработки электромобилей является компания GE, которая активно работает совместно GM в течение последних четырех десятилетий. В 1978 г. компания в сотрудничестве с Chrysler EV реализовала проект по использованию свинцово-кислотных аккумуляторов, а спустя шесть лет данные технологии были использованы в Ford Mercury, где был реализован электропривод передних колес от трубчатых свинцово-кислотных ТАБ. Далее, компанией Ford в проекте Aerostar van были предложены натриево-серные аккумуляторы, работающие при высоких температурах. При этом были достигнуты значительные характеристики пробега до полной разрядки ТАБ – 160 км, при максимальной скорости движения 96 км/ч.

Во Франции к концу 80-х годов 20 века эксплуатировалось около 500 электромобилей. В основном это были реинжиниринговые проекты Peugeot 205 и Citroën C15. В это же время в Германии VW запускает проект электромобиля на платформе Golf. Автомобиль был оснащен свинцово-кислотными ТАБ. Компания Siemens разрабатывает синхронный двигатель трехфазного переменного тока с постоянным магнитом, который использует водяное охлаждение, а также реализует процесс генерации энергии в режимах торможения (рекуперация).

В 1990-х годах в США и Западной Европе были проведены ряд законодательных и регулятивных мер, направленных на улучшение экологической обстановки, при этом происходит возрождение интереса к технологиям электромобилестроения у ключевых автопроизводителей.

В 1990 г. в США были приняты экологические поправки Clean Air Act, а в 1992 г. там же был принят закон об энергетической политике, а также нормативные акты Калифорнийского совета по воздушным ресурсам (CARB). В дополнение к строгим запретам на вредные выбросы в атмосферу, были добавлены требования и правила, требующие сокращения потребления бензина.

В 1990 г. Калифорния приняла свой мандат Zero Emission Vehicle (ZEV), который определяет 2% сегмент транспортных средств с нулевым выбросом к 1998 г., и 10% сегмент к 2003 г. В соответствии с мандатом компания Ford, разработала проект Ecostar, результатом которого стал электромобиль с 105-сильным двигателем. Важной особенностью Ecostar является его «горячая» с рабочей температурой 315 °С натрий - серная ТАБ, конструкция и технология производства которой была разработана специалистами компании еще в 1960 г. Аккумулятор работает при высокой температуре, обеспечивая молекулярную реакцию между расплавленными натрием и серой. Достоинством данного типа ТАБ является обеспечение высоких динамических свойств электромобиля (время разгона от 0 до 96 км/час составляет всего 15 сек.). Однако, специфический температурный режим и технология производства подобных ТАБ ограничивают их применение.

В настоящее время появляются конструкции и технологические проекты, обеспечивающие достаточную эффективность работы электромобилей без указанных выше специфических особенностей. При этом все больше усиливается конкуренция между традиционными марками автомобилей с ДВС, электромобилями и автомобилями с комбинированной энергоустановкой. По сути, сегодня, наблюдается переломный момент в автомобильных технологиях, так же как это было в начале 20 века. И обострение экологических проблем может обеспечить еще более бурный рост соответствующих «зеленых технологий» на транспорте [156, 157, 209].

1.2 Актуализация проблемы обеспечения экологических норм на автомобильном транспорте

Впервые о вредности отработавших газов автомобильных двигателей заговорили в начале 60-х годов 20 века, когда резко увеличилось число заболеваний органов дыхания у людей, вызванных, как установили специалисты, «смогом», который начал часто появляться в городах штата Калифорния в результате работы автомобильных двигателей.

С тех пор этой проблемой занялись всерьёз, что привело к тому, что вопросы экологии транспортного средства на стадии его проектирования стоят в одном ряду с его потребительскими свойствами и безопасностью.

Систематическое исследование проблемы привело к появлению юридических документов (нормативов), ограничивающих концентрацию вредных веществ в отработавших газах. Наиболее требовательными в этом плане являются нормативы «Евро» в странах Европейского союза и законы штата Калифорния США [158].

Правила R 83-02 ЕЭК ООН, известные как «Евро-1» вступили в действие в 1993 г. С момента их введения автомобильные фирмы Европы выпускали только машины, отвечающие этим требованиям. Прошло почти 20 лет и сегодня мировые лидеры автомобильной промышленности уже ориентируют свою продукцию на перспективные требования стандарта «Евро» пятой версии (рисунок 1.1).

За время действия стандартов «Евро» с 1993 года количество вредных веществ в отработанных газах (ОГ) снизилось более чем в 2 раза. Всего за последние 40 лет содержание токсичных компонентов в ОГ одного автомобиля уменьшилось на 70%.

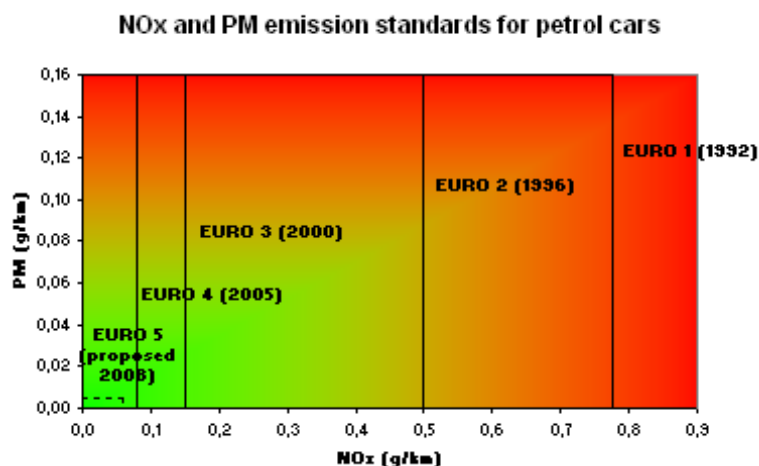


Рисунок 1.1 – Диаграмма ограничений накладываемых разными версиями стандарта «Евро» на бензиновые автомобили

Несмотря на уменьшение вредных выбросов отдельными автомобилями за последние 40 лет, из-за роста их количества общие выбросы углекислого газа, монооксида углерода, углеводородов, уровень шума в городах мира удвоились.

На долю автомобильного транспорта приходится 80% всех выбросов вредных веществ в крупных городах. Кавтомобили не только загрязняют воздух токсичными газами, они еще и сжигают кислород. Для сжигания одного килограмма бензина требуется 13,7 кг воздуха, то есть 2,9 кг кислорода. Уже сейчас на планете сжигается около 90% всего кислорода, вырабатываемого наземной растительностью. Проблема экологичности автомобильного транспорта в настоящее время приобретает все большую актуальность.

С учетом всего вышеизложенного становится понятно, что направление, связанное с так называемыми «зелеными технологиями» в автомобилестроении – это наиболее перспективный путь развития автомобильного транспорта.

Сегодня с точки зрения экологичности, наилучшие показатели имеют автомобили с водородным двигателем и работающие на топливных элементах, но на пути их внедрения стоят многочисленные проблемы, преодоления которых может потребовать массу времени, которого, возможно, уже нет.

У электромобилей (ЭМБ) нет конкурентов по части загрязнения, но и тут не все так просто. Сторонники этого вида транспортного средства часто не учитывают, что электричество для подзарядки электромобиля вырабатывают электро-

станции, которые для этого, в основном, сжигают топливо. То есть, вред природе не уменьшится, просто места выброса вредных веществ сильнее локализованы. Выбросы электромобиля меньше, но все же не равны нулю [132].

Наиболее реальной альтернативой автомобилю, на наш взгляд, является транспорт с комбинированной (гибридной) энергоустановкой (АКЭУ). По многим показателям он превосходит не только автомобиль с обычным приводом, но и ЭМБ.

Таким образом, на фоне продолжающегося ужесточения экологических норм законодательством промышленно развитых стран и, как следствие, усовершенствования конструкций серийно-выпускаемых автомобилей продолжаются исследования для замены источников энергии транспортных средств. Среди возможных на сегодняшний день вариантов, наиболее перспективными, по-прежнему, являются проекты ЭМБ и АКЭУ. В подтверждении нашего вывода приведем мнение экспертной группы Международного Энергетического Агентства (МЭА). Группа МЭА считает, количество и типы ЭМБ и АКЭУ, доступных на рынке существенно возрастет до 2015 года, что ускорит их продажи. В 2014 году глобальные продажи гибридных автомобилей могут достигнуть 2,2 млн. единиц Крупные корпорации, такие как Coca-Cola, AT&T, FedEx и Wal-Mart в настоящее время включают АКЭУ в свои автопарки. Десятки новых ЭМБ и АКЭУ появятся на рынке до 2015 года. Вследствие роста производства коммерческих автомобилей с применением «зеленых технологий», таких как Renault, затраты на обслуживание и сервис падают. Администрация президента США, на основании данных о существенном росте продаж электромобилей, занимается разработкой целевой программы модернизации и развития энергетической инфраструктуры страны.

ЭМБ – автомобиль, приводимый в движение одним или несколькими электродвигателями с питанием от аккумуляторов. Сравнение энергетической эффективности обычного автомобиля и электромобиля, приведенное на рисунке 1.2, показывает, что существующий уровень научного и технологического развития автомобильной отрасли не позволяет существенно снизить уровень потребления энергии ЭМБ в сравнении с обычным транспортным средством.

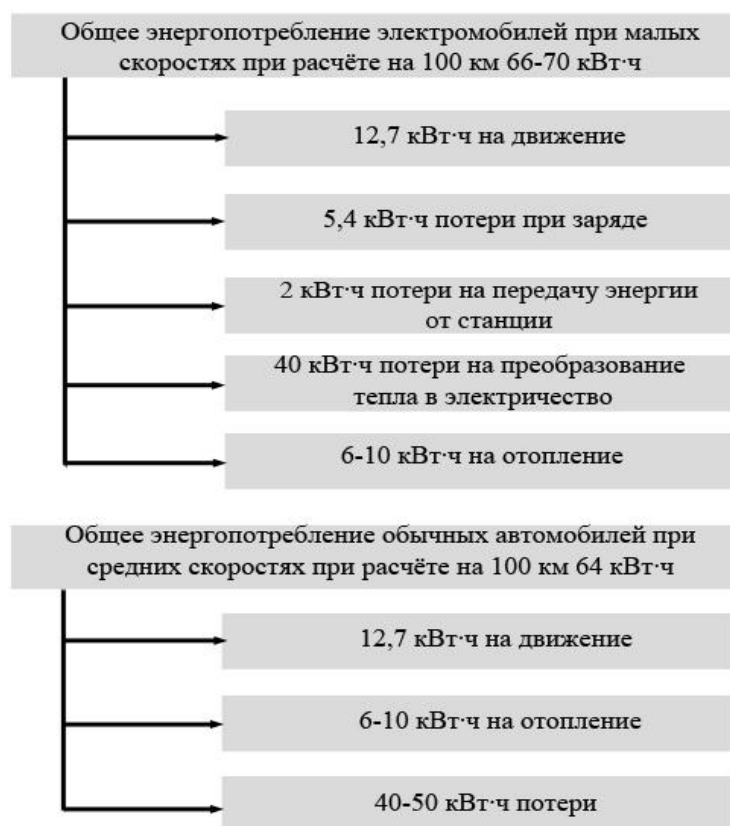


Рисунок 1.2 – Сравнение энергетической эффективности автомобиля и электро-мобиля

Именно поэтому удельная энергоёмкость аккумуляторной батареи сильно влияет на область эффективного использования электромобилей и что ее повышение – одно из наиболее перспективных направлений развития науки и технологий. Кроме того для повышения эффективности электромобилей требуется решение проблемы снижения удельной цены источника тока, а также повышение срока службы ТАБ.

На рисунке 1.3 представлена диаграмма сравнения потребительских характеристик обычного автомобиля и ЭМБ.

Анализ данных (рисунок 1.3) показывает, что по целому ряду показателей электромобиль превосходит обычное транспортное средство: рекуперация энергии торможения, экологичность, ускорение, энергетическая эффективность летом.

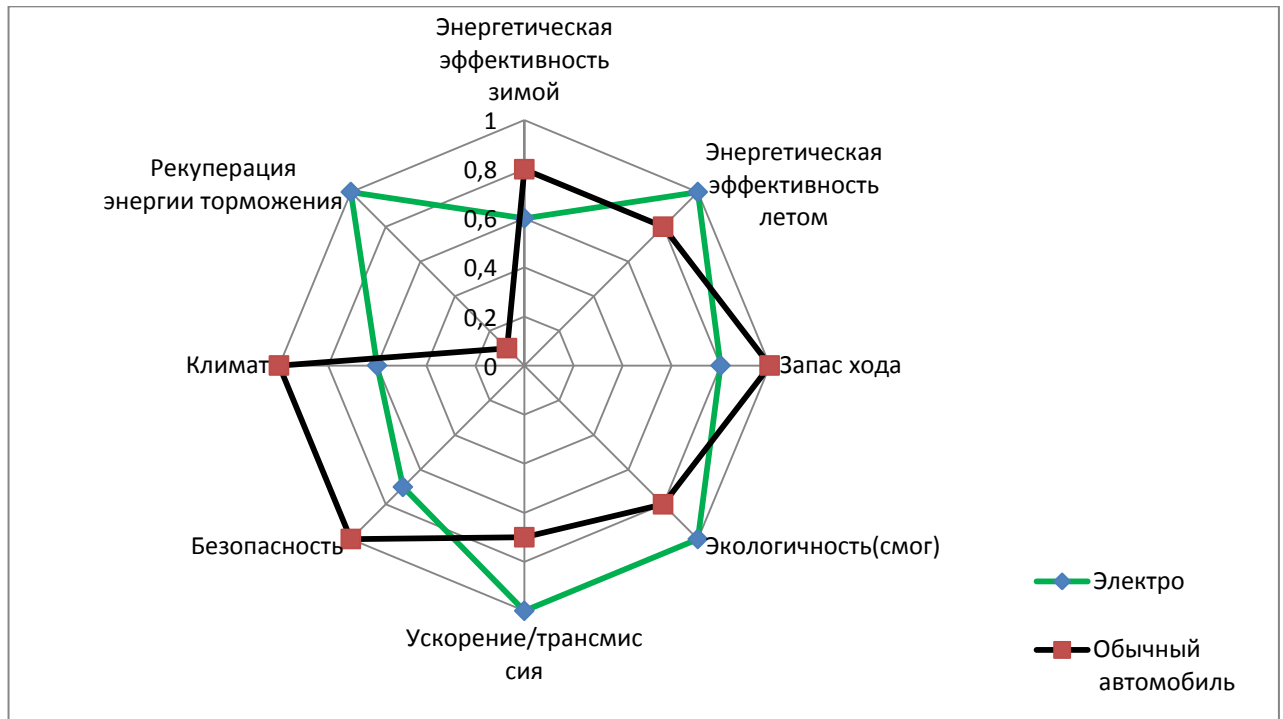


Рисунок 1.3 – Диаграмма сравнения потребительских характеристик обычного автомобиля и ЭМБ

Автомобиль с комбинированной энергоустановкой (АКЭУ) – автомобиль, использующий для привода ведущих колес не только энергию ДВС, но и накопленную в электрохимических, электростатических или механических устройствах энергию. По методу подключения ДВС и накопителя к приводу выделяют схемы:

- параллельная – двигатель и накопитель соединены дифференциалом, который соединен с приводом колес (рисунок 1.4). Используется в автомобилях Integrated Motor Assist (Honda). Характеризуется простотой и низкой стоимостью;

- последовательная – двигатель соединен только с накопителем, который в свою очередь соединён с приводом колес (рисунок 1.5). Близкий принцип используется в электрической трансмиссии, которая применяется в случаях, когда необходимо передать большой момент с ДВС на колеса;

- последовательно-параллельная – система может работать как последовательно, так и параллельно, в зависимости от режима работы. Реализовано в автомобилях с Hybrid Synergy Drive (Toyota), например, Toyota Prius.

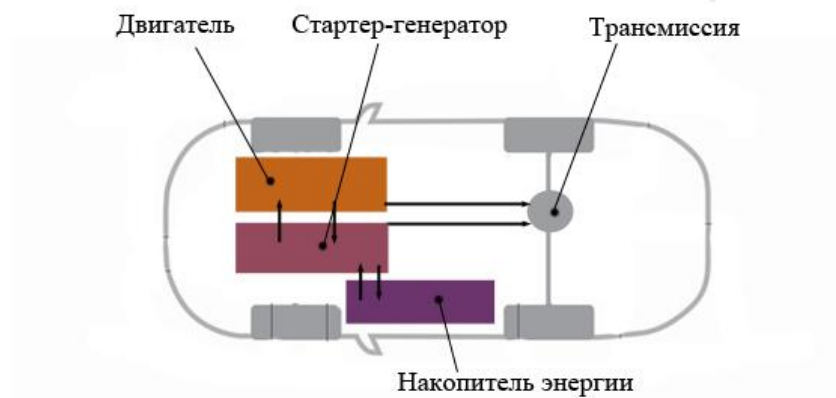


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема параллельной гибридной силовой установки

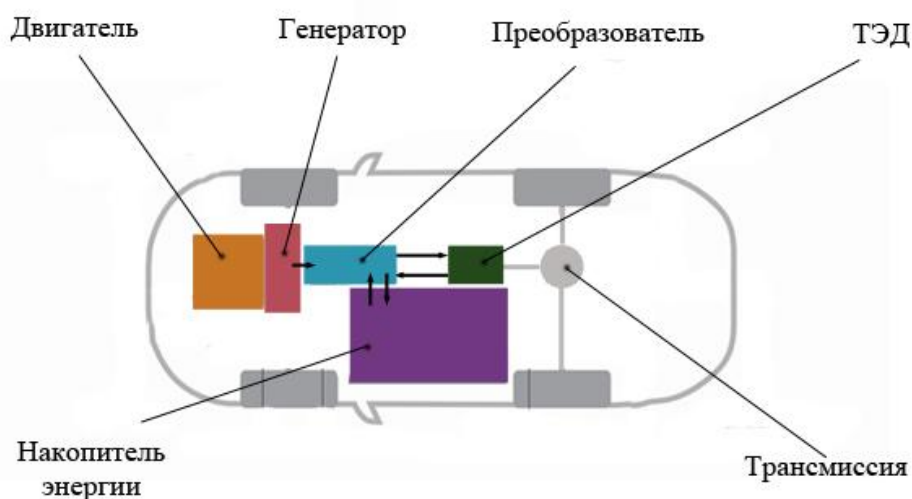


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема последовательной гибридной силовой установки

Перечислим некоторые достоинства автомобилей с КЭУ [158]: в настоящее время у большинства новых моделей мощность достигает 100 кВт, в то время как средняя используемая мощность составляет в черте города порядка 7,5 кВт. Коэффициент полезного действия при этом очень мал и составляет порядка 20%. В АКЭУ устанавливается не большой ДВС, работающий в режиме, близком к максимальному КПД, при этом КПД будет почти так же высок, как и у тепловой электростанции, благодаря оптимальной конструкции двигателя. Расход топлива у АКЭУ может быть на 90% меньше, чем у аналогичного по характеристикам автомобиля. По сравнению с электромобилем АКЭУ при одинаковых габаритах обладает большей эксплуатационной эффективностью. В настоящее время многото-

пливные двигатели обычно конструируются таким образом, чтобы оптимальные параметры достигались при работе на бензине, в то время как многие типы двигателей (такие как газотурбинный двигатель) можно сконструировать так, чтобы они эффективно работали на альтернативном топливе. В АКЭУ гораздо легче добиться топливной экономичности на уровне 1,5 – 2 л/100 км.

Среди достоинств АКЭУ следует выделить и то, что постройка автомобиля с гибридным приводом на основе серийно выпускаемой модели не требует дополнительных затрат по разработке кузова и механической части. Изменения, вносимые в конструкцию, минимальны, поэтому АКЭУ может выпускаться как одна из модификаций существующей модели автомобиля. Без применения дополнительных приводных валов и раздаточных механизмов удаётся получить автомобиль, обладающий полным набором преимуществ полноприводных машин, таких как лучшая управляемость и курсовая устойчивость, лучшая проходимость и реализация момента и мощности, подводимых к колёсам [132].

По сравнению с обычным полноприводным автомобилем улучшается эластичность, в частности, разгон с места занимает меньше времени за счёт того, что электродвигатель развивает максимальный крутящий момент почти сразу после начала набора оборотов. Кроме того, уменьшается уровень шума. Расход топлива снижается ещё и потому, что отсутствуют механические потери в приводе от ДВС к мосту. Электродвигатель лучше поддаётся электронному управлению, что создаёт дополнительные возможности регулирования реализации крутящего момента на осях и колёсах. Схема не требует установки дополнительных ТАБ, автомобиль всегда может двигаться в моноприводном варианте только от ДВС.

Не смотря на существенный прогресс развития ЭМБ и АКЭУ наблюдаемый в настоящее время, существуют мнения западных и российских экспертов о невысокой перспективности развития данных технологий как на территории РФ так и в мире.

Президент альянса Renault-Nissan не видит предпосылок развития производства гибридных автомобилей в России. По его словам, в России на данном этапе нет предпосылок для развития направления электромобилей и гибридов.

«Во-первых, Россия добывает много нефти, во-вторых, Россия – очень большая страна, в-третьих, в России пока никто не стимулирует развитие рынка гибридов и электромобилей», - сказал К. Гон. «По этим причинам я не думаю, что Россия будет в первых рядах в том, что касается электромобилей и гибридов, - заявил он. – Конечно, Россия сможет потом быстро догнать другие страны, если правительство в какой-то момент решит поддержать развитие этих технологий». «Но пока что, на данный момент, я не вижу особого движения в этом направлении», - подчеркнул президент альянса Renault-Nissan [194].

Президент Mazda Такаши Яманучи считает, что цель развития марки Mazda – улучшение базовых технологий. Что будет потом – водород, топливные элементы, биотопливо или электричество, пока говорить рано. Если к 2030 г. сбыт новых машин вырастет до 100 млн, то, согласно прогнозам, в лучшем случае лишь четверть из них окажется полностью на электротяге. Остальные 75% автомобилей в том или ином виде продолжают использовать традиционные дизельные и бензиновые моторы, и в количественном выражении это больше, чем сегодня продается машин во всем мире. Сейчас даже в Японии нет достаточного числа людей, готовых отдать свои деньги за электромобиль [207].

Глава автомобильного концерна Daimler AG Дитер Цетше во время Женевского автосалона сказал: «Пока, несмотря на все достоинства электромобилей, у них есть и свои ограничения. Например, необходимость тратить время на подзарядку. И хотя технологии постоянно совершенствуются, естественный рост до 20% рынка к 2020 году мне кажется практически недостижимым» [200].

Темпы производства и внедрения электромобилей в России будут отставать от других развитых стран, считает партнер и руководитель практики по оказанию услуг компаниям автомобильной отрасли PwC Стенли Рут. В России в настоящее время обеспокоенность вопросом вредных выбросов не столь остра как в Европе или США. Самая обширная по территории страна в мире ежегодно затрачивает колоссальные средства на транспортные цели [202].

Для определения итогов и тенденций развития мировых брендов выпускающих ЭМБ и АКЭУ были проанализированы более 150 сообщений и статей от-

носящихся к рассматриваемому вопросу, опубликованных в российских СМИ и в сети Интернет в течение 2011 – 2014 гг. На рисунке 1.6 представлены наиболее важные, на наш взгляд, успехи мировых лидеров автомобильной промышленности. Среди выделенных позиций (рисунок 1.6) особенно важны две последних, потому что они касаются отечественной автомобильной промышленности. Следует отметить, что развитие производства ЭМБ и АКЭУ в России возможно на сборочных предприятиях мировых лидеров работающих в нашей стране.

Тенденции развития отрасли определяются соответствующими тенденциями развития автомобильных марок – лидеров мирового автомобилестроения. На рисунке 1.7 представлены основные ожидания автопроизводителей и компаний компонентной отрасли на ближайшие годы [159].

Таким образом, проведенный анализ текущей ситуации и тенденций развития производства электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой показывает:

- в последние 10 лет происходит беспрецедентное развитие «зеленых технологий» в автомобильном транспорте. Несмотря на существующие проблемы, внимание к «зеленым технологиям» со стороны крупнейших мировых компаний с каждым годом возрастает;

- наблюдается системная интеграция лидеров автомобильного рынка и компаний, разрабатывающих и выпускающих высокотехнологичную инновационную продукцию для решения проблемы повышения эффективности автомобильного транспорта с «зелеными технологиями». При этом особую роль приобретают электротехнические комплексы и системы, образующие так называемые электрические технологии на транспорте;

- параллельно с развитием производства автомобилей с применением «зеленых технологий» происходит быстрое развитие сферы услуг использующей и (или) базирующейся на соответствующем фундаменте технологий;

- на государственном уровне в развитых странах разрабатываются программы стратегического развития экологических видов транспорта и инфраструктурных проектов энергообеспечения.

**Итоги развития марок
автомобилей с
«зелёными» технологиями в 2011 г.**



Модель Camry 2012 года принципиально не отличается от предыдущей, она снабжена улучшенной версией прошлогоднего двигателя - достаточно мощным 2,5-литровым четырехцилиндровиком, который вкуче с электромотором дает 200 л. с. Усовершенствованная система рекуперативных тормозов перерабатывает электричество больше энергии, что в сочетании с новой силовой установкой сокращает расход топлива до 5,7 л на 100 км в смешанном цикле и 5,5 л на 100 км в городе.



Новый кроссовер Lexus CX появится в 2012 году. В движение автомобиль будет приводить четырехцилиндровый бензиновый мотор и электродвигатель, которые вместе смогут производить порядка 200 лошадиных сил мощности и при этом расход топлива составит примерно 5 литров на 100 км пробега.



Первый в мире представительский электромобиль. Под капотом лимузина скрывается электродвигательная установка от британской компании "Lotus Engineering". В состав установки входят 2 электромотора мощностью 290 кВт каждый и аккумуляторная батарея исполинских размеров весом в 640 кг. Емкость литий-ионных батарей составляет 74 кВт·ч. Такие мощные источники питания позволяют лимузину разогнаться за 8 сек до скорости 100 км/ч. Без подзарядки лимузин способен преодолеть порядка 200 км, несмотря на гигантскую массу в 3 тонны. Максимальная скорость искусственно ограничена на отметке 160 км/ч. Инженерам удалось сделать хорошее распределение массы автомобиля по осям лимузина. Для зарядки аккумуляторов электролимузина необходимо не менее восьми часов при 3 х фазном источнике питания, а при однофазном время зарядки составляет, около 20 часов.



Tesla Roadster способен разогнаться до 100 км/ч менее чем за 6 с. Максимальная скорость принудительно ограничена 201,1 км/ч. Зарядка литий-ионных батарей хватает на 300-400 км. Полная зарядка аккумуляторов занимает 3,5 часа. Стоимость базовой модели — 109 000 долларов.



Nissan Leaf - один из самых популярных в Северной Америке электромобилей. Масса батареи около 300 кг с расположением под передними сиденьями. Емкость батареи 24 кВт·ч. С учетом возможностей рекуперативного торможения, емкости АКБ хватает на 160 км. Жизненный цикл батарей - 5 лет. Полный цикл заряда АКБ от бытовой электросети - 8 часов при использовании специального комплекта Nissan - 30 минут.



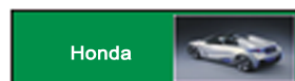
i-MiEV - это первый электромобиль который реализуется с 2011г на территории РФ. Аккумуляторная батарея - это совокупность 88 литий-ионных элементов, место для них нашлось под сиденьями первого и второго ряда, для чего разработан специальный подрамник. Емкость батареи — 16 кв/час, масса 180 кг, ее хватает на 160 км пути в режиме эконо или 147 км в обычном. В сравнении с ценой бензинового топлива эксплуатация электромобиля выгоднее примерно в 9 раз. Электромотор выдает 64 л.с. при 180 Н/м, двигатель обеспечивает разгонную динамику до 100 км/час за 9 с и максимальную скорость 130 км/час.



В гамму моторов Chevrolet войдут несколько новых двигателей и нынешние агрегаты объемов 2.0 и 2.4 литра. Велика вероятность, что модель получит гибридную силовую установку, объединяющую 185-сильный бензиновый двигатель объемом 2.4 литра и электромотор мощностью 15 л.с., который питает 115-вольтовая литий-ионная батарея.



Ford заявляет, что пробег на одной зарядке у Focus будет 118 км От 240-вольтовой сети Focus полностью заряжается за три часа. Максимальная скорость- 135 км/ч. Рулевое управление, подвеска и тормоза те же, что и у обычной модели.



Концептуальный родстер EV-STER, который представители СМИ называют идеологическим преемником Beat, оснащен электродвигателем и литий-ионной батареей емкостью 10 кВт·ч. Компактный спорткар длиной 3 570 мм разгоняется с 0 до 96 км/ч за 5 с и способен проехать на одной зарядке аккумуляторов 160 км.



Renault анонсировал цены на бюджетный электромобиль Twizy, который поступит в продажу в конце 2011 года. Стоимость автомобиля составляет 6900 евро с учетом всех налогов, что соответствует примерно 272 тыс. рублей. Таким образом, Twizy станет самым дешевым в мире серийным электромобилем длиной всего 2,4 метра, вмещающее двух пассажиров. Дополнительно придется заплатить за лизинг батареи - при пробеге до 7500 километров в год аренда обойдется в 45 евро в месяц. Аккумуляторы Twizy рассчитаны на пробег до 115 километров, а зарядка от домашней электросети займет 3,5 часа.



40-сильный электромотор разгоняет ForSpeed до 60 км/ч за 5,5 секунд, максимальная скорость авто - 120 км/ч. На одной зарядке автомобиль может проехать до 135 км. Более того, для подзарядки батарей на 80% (сделать это можно, подключив авто к обычной 220-вольтовой розетке) требуется лишь 45 минут.



Под капотом 120-килограммовый аккумулятор, электромотор и редуктор. В привычном автомобильном измерении все это тянет на 80 лошадиных сил, но правильнее все таки говорить "60 киловатт". Разгонная динамика приятно удивляет, она даже лучше, чем у бензиновой "Калины". На одной зарядке машина провезёт вас 150 километров. "Калина" стоит 1,5 миллиона рублей. Если по циклам заряда заряжать каждый день, то это примерно на 8 лет получается, если по пробегу, по 150 километров, то под полмиллиона километров".



Максимальная скорость автомобиля 120 км/час. В качестве накопителя энергии используется блок электрических супер конденсаторов, массой менее 100 кг, размещаемый под задними сиденьями. Для его полной зарядки требуется 10 минут. Конденсатор емкостью 9,6 Ф должен зарядиться за 20-30 сек при мощности генератора 30 кВт. Заявленный межсервисный пробег — 40 тыс. км. Для увеличения ресурса 0,6-литровой энергетической установки ё-мобиля массой 55 кг предполагается уменьшить её мощность со 100 кВт до 45 кВт. Цена от 360 до 490 тыс. рублей. Производство автокомплектов планируется осуществлять на региональных мини-заводах с годовой программой 10 тыс. автомобилей.

Рисунок 1.6 – Итоги развития автомобильных марок выпускающих электромобили и гибриды в 2012 г.

Перспективы развития автомобилей с «зелёными технологиями»

















	2012	В ноябре 2011 года компании Nissan начала продажу и установку в Японии бюджетной станции быстрой зарядки электромобилей. Стоимость устройства составляет от 9 до 13 тысяч долларов, что в два раза дешевле предыдущей модели. В ближайшие пять лет Nissan рассчитывает установить в Японии не менее 5000 электрических АЭС собственной разработки. Ими будут оснащены все дилерские центры компании, а также государственные предприятия и другие места массового скопления людей. В Nissan подчеркнули, что готовы вести переговоры о создании аналогичной инфраструктуры в Европе.
	2012	Крупный китайский автопроизводитель SAIC Motor Corp., который имеет совместные предприятия с несколькими европейскими автокомпаниями активно расширяет свое сотрудничество. Сейчас о договоренностях заявляет Volkswagen. Согласно заявления китайского министерства промышленности и информационных технологий, автомобиль будет продаваться под новым брендом партнеров - Tantus. Ведомство раскрыло планы V/W на электро-сегмент китайского авторынка во время обнародования информации о новых автомобилях, которые были одобрены для производства в Китае. Владельцам новой бренда будет ShanghaiVolkswagen. А первая модель Tantus - электромобиль - станет первой ж машиной СП на электротяге. Подробностей о самом автомобиле пока нет. Весной 2011 года также были обнародованы планы Volkswagen на выпуск электрокара совместно с другим китайским автопроизводителем - FAW Group, с которым немецкий концерн также имеет СП. Эту новинку планируется выпускать под брендом KaiTi, также специально созданным для электрических автомобилей СП.
	2013	Специалисты американской компании предлагают использовать новый тип батарей. Проблема малого запаса хода у электромобилей до сих пор не теряет своей актуальности. Впрочем, весьма интересное решение разрабатывают специалисты IBM. Как сообщает издание NewScientist, исследователи предлагают использовать вместо литиево-ионных батарей литиево-воздушные, которые занимают значительно меньше места и могут обеспечить запас хода до 800 километров. Что же удерживает IBM от создания и полноценного использования литиево-воздушных аккумуляторов? Оказывается, проблема заключается в том, что срок службы таких батарей слишком мал и при постоянной зарядке сокращается, что в настоящее время делает невозможным их применение в автомобилях. Тем не менее, специалисты IBM активно ищут решение проблемы. Так, ученые уже подобрали альтернативный электролит, который может снять ряд вопросов. В компании планируют создать полноразмерный прототип батареи нового типа уже к 2013 году, в то время как в серию аккумулятор должен пойти несколькими годами позже.
	2013	В планах Bosch к 2013 году запустить около 20 проектов для автопроизводителей. К примеру, Bosch и немецкий автопроизводитель Daimler подписали меморандум о намерениях, о создании СП для разработки и производства электродвигателей для электромобилей в Европе.
	2013	Американская автостроительная компания "Тесла моторс" объявила в понедельник о планах выпустить в 2012 году электромобиль, способный проехать до 480 км на одной подзарядке. Стоимость новинки в зависимости от экономичности будет достигать от 57 тыс. до 77,4 тыс. долл. Это почти на 20 тыс. долл. дороже базовой модели седан класса "Эс". Как уточнил вице-президент "Теслы" Джордж Бланкеншип, поступили заказы на 3,7 тыс. таких электромобилей. Компания намерена выпустить на рынок в 2012 году до 5 тыс. данных машин и довести их производство до 20 тыс. единиц в 2013 году.
	2013	BMW планирует инвестировать 400 млн евро в завод в Лейпциге с целью увеличения к 2013 году выпуска электромобилей. В прошлом году компания завершила инвест-проект стоимостью \$750 в США, Спартанберге, создав новую площадку для сборки обновленных полноприводных BMW X3. В 2013 году BMW планирует продать не менее 30 000 i30 по цене от 40 000 евро. Городской люксовый компакт будет построен на алюминиевом шасси, несущем кузов из пластика, усиленного углеродными волокнами. Приводить его в движение будут электромоторы суммарной мощностью 136 л. с.
 	2014	BMW Group и PSA Peugeot - Citroen подписали соглашение по созданию BMW Peugeot-Citroen - СП на паритетных началах по развитию гибридных технологий, говорится в совместном сообщении компаний. Стороны подписали меморандум о взаимопонимании по сотрудничеству по гибридным технологиям. BMW Peugeot-Citroen Electrification начнет работу во 2 квартале 2011 года. Автомобили компаний будут оснащаться новыми гибридными компонентами с 2014 года.
 	2014	В 2013-2014 году автомобильный мир ожидает настоящая гибридная революция. Именно в эти годы два крупных концерна собираются начать массовое производство машин с так называемыми подзаряжаемыми гибридными установками. Их главной особенностью является то, что аккумуляторы можно будет «заправлять» от обычной розетки, что позволит ежедневно проезжать исключительно на электротяге два-три десятка километров.
	2015	В стратегии HyundaiMotorGroup написано, что в 2015 г. Hyundai должна развернуть массовое производство гибридных автомобилей, отмечает он. Одновременно группа будет изучать перспективы электромобилей. А опыт HyundaiEngineeringConstruction поможет создать инфраструктуру для гибридных машин и автомобилей на альтернативном топливе, утверждает Аренс. В марте на Сеульском автосалоне Hyundai показала две новых разработки – гибридную Scanta и концепт-кар Blue2 с двигателем на водороде и электроприводом.
	2016	SEAT поделилась амбициозными планами: с 2015 года должно начаться производство гибридов, а с 2016 электрокаров. О гибридном прототипе LeonTwin-Drive пока известно мало: только то, что он может ездить как на электротяге, так и с классическим двигателем внутреннего сгорания. На электричестве его максимальная скорость -120 км/ч, и одного заряда хватит на 52 км. Батареи электрокара Altea XLElectricEcomotive существенно эффективнее, их хватит на 135 км. Электродвигатель мощностью 115 л.с.с максимальным крутящим моментом 270 Нм способен разогнать новинку до 135 KM/ч.
 	2016	В 2016 г. Согласно стратегическому плану Renault-Nissan альянс намерен в 2011-2012 гг. начать продажи четырех моделей электромобилей и вывести на рынок новые электромобили в 2014-2016 гг. В 2015 г. Renault-Nissan собирается Произвести 500 000 электромобилей, а в 2016 г. Парк электромобилей, выпущенных альянсом, должен составить 1,5 млн штук.
	2020	Mitsubishi Motors согласно ее стратегическому плану делает ставку на электромобили, которые должны к 2020 г. занимать около 20% продаж, а до 2015 г. намерены разработать восемь таких моделей.
	2046	Компания TataTechnologies на примере концептуального электрокара eMO EV продемонстрировала, какими она видит городские машины в 2046 году. В движение субкомпактную четырехдверку приводят два электромотора с жидкостным охлаждением, вращающие передние колёса, и блок литий-ионных батарей емкостью 18,4 кВт·ч (охлаждение-воздушное). С таким силовым агрегатом eMO (Electric MObil) способен разогнаться до 105 км/ч и проехать на одной зарядке до 160 км).

Рисунок 1.7 – Перспективы развития электромобилей и гибридов

1.3 Ключевые аспекты изменений в автомобильной промышленности в контексте развития электрических технологий

Развитие электромобилей и автомобилей с КЭУ представляет собой направление несущее серьезные изменения для традиционной автомобильной промышленности, ее конструкторской и технологической базы. Эти фундаментальные преобразования обеспечивают более крупные научно-технические прорывы, чем реализация любых новых проектов в рамках традиционных форм. В еще большей степени, такая тенденция характерна для проектов АКЭУ. Большой интерес при этом представляет собой решение задачи взаимодействия электромобилей и соответствующей структуры электроснабжения. Кроме того, существуют проблемы обеспечения качества и надежности таких автомобилей по причине отсутствия специальных инструментов ориентированных на данный сегмент транспортных средств [158].

Развитие «зеленых технологий» выводит на рынок целый ряд новых игроков – производителей соответствующих компонентов и услуг, изменяется конкурентная среда, даже в большей степени, чем можно было бы предполагать.

Важнейшее значение для успешного внедрения электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой по всему миру приобретает взаимосвязь между тремя наборами технологий, а также проблема качества их обеспечения. Первичными проблемами проектов таких автомобилей являются: хранение электроэнергии, обеспечение привода колес, а также реализация алгоритмов оптимального управления движением в различных режимах [160].

Существует также целый ряд вторичных проблем, которыми необходимо заниматься для обеспечения эффективности транспортных средств: снижение веса, анализ затрат и выгод от использования новых дорогостоящих материалов и т.д.

Повышение уровня плотности энергии хранимой в ТАБ, при снижении массы транспортного средства позволяет обеспечить конкурентные преимущества экологических автомобилей в сравнении традиционными. Однако, в последнее де-

сятилетие, в связи с повышением значимости электронных компонентов в автомобильной промышленности, наряду с обозначенными выше задачами вскрываются проблемы оптимизации управления системами ЭМБ и АКЭУ, и обеспечение соответствующего уровня качества управления [161, 165].

Накопители энергии. Плотность энергии ТАБ все еще далека от оптимальной, и поэтому все аспекты проектирования электромобилей и автомобилей с КЭУ должны быть тщательно проанализированы, с целью получения продукта с приемлемым диапазоном технических параметров и стоимости. Стоимость ТАБ имеет тенденцию доминировать над соответствующими экономическими параметрами других компонентов, поэтому высокую актуальность приобретают проекты, имеющие средний технический уровень, при обеспечении снижения массы транспортного средства. Другим направлением развития технологий, является активное развитие системы взаимодействия транспортных средств и обеспечивающей инфраструктуры. Так, для покрытия сети электрических заправок в условиях крупной городской агломерации требуется значительные изменения в энергетической инфраструктуре. Данное обстоятельство отражает необходимость реализации мер поддержки «зеленых технологий» со стороны государства [167].

Именно поэтому, до сих пор ЭМБ и АКЭУ зачастую доступны только в премиум классе. Покупка соответствующего транспортного средства классом ниже спонсируется со стороны некоторых государств. Для массового производства и эксплуатации автомобилей с «зелеными технологиями» требуется разработка и реализация эффективных инструментов управления качеством работы энергетических сетей, внедрение интеллектуальных комплексов измерения. Все это обеспечивает возможности для более эффективного управления общей загрузкой сети. Инфраструктурные вопросы должны рассматриваться вместе с вопросами проектирования и производства соответствующей техники.

Уже сейчас в некоторых Европейских городах начинают реализовывать программы индукционной зарядки электромобилей, на специально выделенных «медленных» полосах движения.

Таким образом, несмотря на наличие существенных проблем в области соз-

дания и эксплуатации ЭМБ и АКЭУ, необходимо отметить, что соответствующие сегменты рынка находятся в фазе активного развития. Уже сейчас становится понятным, что внедрение экологических видов транспорта в первую очередь затрагивает крупные городские агломерации Северной Америки, Западной Европы, Китая и Японии.

1.4 Новые технологии автомобилестроения

Как было отмечено ранее, развитие технологий в вопросах проектирования и производства ЭМБ и АКЭУ обеспечивает существенные изменения и преобразования в автомобильной отрасли в целом. На первый план выходят проблемы связанные с комплексной оптимизацией всего транспортного средства. Важнейшая компонентная область при этом определяется системами: хранения электроэнергии, электропривода и электроникой управления транспортным средством. С учетом особой важности проблемы оптимизации массы автомобилей, уже сейчас можно предположить, что в ближайшей перспективе произойдут технологические прорывы в направлениях оптимизации кузова, трансмиссии, подвески и т.д. Решение ключевых проблем развития новых технологий лежит в области комплексной интеграции технологических решений [165].

Потенциальные технологические проблемы при проектировании новых электромобилей и автомобилей с КЭУ заключаются в необходимости решения задач: распределения массы автомобиля, влияющей на динамику транспортного средства; оптимального распределения комплектующих изделий внутри автомобиля, которое может повлиять на показатели безопасности; электропередачи от ТАБ к приводу, влияющей на энергоэффективность; электромагнитной совместимости, влияющей на качество функционирования транспортного средства в целом, а также представляющей потенциальную опасность для здоровья водителя и пассажиров; общих вопросов обеспечения надежности транспортного средства, с учетом недостаточно высокого уровня качества автомобильного электрооборудования [162].

Одной из главных проблем в развитии новых технологий автомобилестроения является то, что в цепочке создания ценности появляются новые игроки, которые в некоторых случаях не имеют необходимый опыт в управлении качеством и надежностью существующего в автомобильной промышленности. Решение данной проблемы требует налаживания новых отношений и передачи соответствующего опыта работы. Однако, специфика проектирования и производства электромобилей и автомобилей с КЭУ подразумевает необходимость разработки нового комплекса инструментов обеспечивающего требуемый уровень качества и надежности продуктов и услуг. Несомненно, что отправной точкой в реализации данной задачи является использование прогрессивных технологий управления качеством и надежностью сложившихся при проектировании и производстве компонентов системы электрооборудования традиционных автомобилей. При этом необходимо учитывать и инфраструктурные изменения, носителями которых являются новые требования по обеспечению эксплуатационной эффективности таких транспортных средств [158].

Производители автомобильных компонентов, для сохранения собственных конкурентных позиций, диверсифицируя свои бизнес-проекты, вступают в альянсы с новыми компаниями, реализующими инновационные проекты в области экологичного автотранспорта. Новым направлением развития при этом является комплексная работа по развитию производственно-сбытовой сети, определяющая необходимость разработки единых стандартов обеспечения инфраструктурных процессов для автомобилей, с учетом их совмещения с традиционными производственными и обслуживающими структурами. Одной из ключевых остается задача поддержания качества функционирования соответствующих процессов.

Общий анализ развития новых технологий в автомобилестроении показывает, что одним из важных вопросов является определение перспективных конструкций силовых агрегатов. Сегодня лидеры рынка рассматривают широкий спектр технологических решений в данной области, которые в основном связаны с источниками энергии: биотопливо, топливные элементы, электрические технологии и т.д. [158, 209].

Mercedes-Benz, GM, VW, Toyota и другие производители рассматривают технологии, основанные на применение топливных элементов, с целью достижения долгосрочных перспектив развития, с учетом сложности решения инфраструктурных проблем эксплуатации ЭМБ и АКЭУ. Тем не менее, успех топливных элементов зависит от разработки экономически эффективных технологий использования водорода, а также решения примерно тех же инфраструктурных вопросов. Биотопливо, также находится под пристальным вниманием автопроизводителей, однако его широкое применение ограничено недостаточными производственными мощностями получения и переработки ресурсов.

С точки зрения обеспечения рабочего цикла транспортных средств, не так явно просматриваются преимущества ЭМБ и АКЭУ по сравнению с другими технологиями. В современных условиях использование электрических технологий в качестве способа снижения выбросов CO₂ по-прежнему экономически дорогое решение. Пока еще можно говорить о повышении топливной и экологической эффективности традиционных автомобилей с ДВС. Однако в ближайшей перспективе электрические технологии могут стать более предпочтительными по причинам:

- наличия большого исследовательского потенциала в данной области;
- реализации развитыми странами государственных программ поддержки соответствующих технологий;
- понимания автопроизводителей и компонентного кластера, что расширение спектра технологий приведет к усложнению структуры рынка и конкуренции между производителями разных транспортных средств.

Анализ экспертных прогнозов развития автомобилестроения показывает, что потребуется значительное время для того, чтобы новые технологии стали доминирующими. Основной причиной такого положения является то, что автопроизводители не слишком заинтересованы в глобальных изменениях и не всегда готовы осуществить кардинальный переход от технологий, которые разрабатывались и применялись десятилетиями [209].

Также, необходимо отметить, что, несмотря на значительный исторический

задел в вопросах проектирования и производства электромобилей и автомобилей с КЭУ, технологически мы находимся на относительно ранней стадии развития.

В настоящее время в мире происходит формирование инновационных центров развития соответствующих технологий. И, если провести общую классификацию данного процесса то можно выделить США, Японию, Германию и Францию как центр научно-технического развития, а Китай как основной центр промышленной реализации инженерных проектов. Причем, Китай активно наращивает инженерный потенциал, и достаточно скоро может выйти на позиции научного центра в данном вопросе. Уже сейчас КНР является крупнейшим в мире производителем бытовой электроники, а кроме этого корпорация BYD занимает одно из лидирующих мест по объему производства электрических транспортных средств, и в качестве собственной стратегической цели развития заявляет комплексное управление всех уровней цепочки жизненного цикла автомобилей, начиная от проектирования заканчивая утилизацией. Еще одним аргументом в пользу быстрого развития «зеленых технологий» в Китае является то, что порядка 80% мировых разведанных запасов редкоземельных металлов необходимых в производстве электрических машин высокой мощности находятся на территории данного государства. В Китае действует государственная программа поощрения покупателей в случае приобретения ЭМБ и АКЭУ. Размер премии установлен на уровне 8800 долл. США. Китайское правительство по существу видит в процессе электрификации автомобилей решение проблем собственной энергетической безопасности и загрязнения окружающей среды в крупных городах.

1.5 Проблемы, влияющие на потребительский спрос электромобилей и автомобилей с КЭУ

На потребительский спрос ЭМБ и АКЭУ влияет широкий спектр вопросов, начиная от практических соображений по модельному ряду, времени автономной работы, заканчивая экологическими соображениями.

На развитых европейских и американских рынках, существуют экспертные группы специалистов, целью которых является убедить потенциальных потребителей, в том, что электромобили и автомобили с КЭУ являются будущим автомобильной промышленности.

Исследования в области потребительской удовлетворенности показывают, что, несмотря на наличие желания изменить экологическую ситуацию, стать частью устойчивого развития транспортных технологий, принятие электромобилей или автомобилей с КЭУ в качестве личного транспортного средства является сложным вопросом для потенциальных покупателей.

Исследование, проведенное экспертной группой RH&EV Института транспортных исследований США, показало, что при изучении вопросов воспринимаемого качества электромобилей BMW [158, 209]:

- большинству потребителей требуется большой диапазон пробега транспортного средства между подзарядками ТАБ;

- процесс планирования поездки на электромобиле гораздо сложнее, чем на автомобиле с ДВС. При этом потребителям приходится в большей степени использовать электронные карты для планирования маршрутов, постоянно определять расстояние до работы и других мест регулярного посещения, учитывать рельеф местности;

- в процессе движения водители уделяют значительное время оценке состояния дисплеев отражающих фактический уровень зарядки ТАБ, что в некоторых случаях влияет на безопасность эксплуатации транспортного средства.

Наиболее важное значение для потребителей при эксплуатации электромобилей имеет количественный уровень зарядки ТАБ и трансформация этого параметра в конкретный пробег, а также наличие системы рекуперации энергии и GPS – навигатора.

Почти треть американских покупателей автомобилей заинтересована в покупке электромобиля. Для них это второй автомобиль в семье.

Экспертная группа Ipsos отмечает большой интерес к электромобилям в 5 странах [209]: Израиль – 57% водителей заинтересованы в покупке электромоби-

ля, Дания – 40%, Австралия – 39%, Канада – 35%, США – 30%. Исследование показало, что: почти половина потребителей готово рассмотреть вопрос о переходе от бензиновых двигателей; интерес к электромобилям охватывает все демографические группы потребителей, большинство покупателей автомобилей в США обеспокоены загрязнением воздуха или изменением климата (62%), а также озабочены зависимостью страны от нефти (74%).

Большая часть респондентов (78%) заинтересована в области развития технологий возобновляемой энергии, снижения мирового потребления нефти (59%), и снижения загрязнений (55%).

При этом опросы потребителей показывают некоторые опасения в части использования биотоплива на транспорте, которые связаны с возможным кризисом в сельском хозяйстве и снижением производства продуктов питания.

Ежегодное исследование группы Harris Interactive в Европе показывает, что 13% европейцев с высокой степенью вероятности готовы приобрести АКЭУ, не принимая во внимание его стоимость.

Исследование показало, что 30% европейских потребителей, которые заинтересованы в приобретении электромобиля хотели бы, чтобы зарядка ТАБ проходила не более 1 раза в сутки в течение времени не более 6 часов.

Важное значение для потребителей имеет вопрос организации процесса обслуживания и подзарядки ТАБ транспортных средств.

Таким образом, экспертные данные показывают, что покупка ЭМБ и АКЭУ становится все более привлекательной для потребителей. Однако замедление темпов роста мировой экономики вносит в этот процесс свои коррективы.

1.6 Проблемы безопасности перспективных транспортных средств

В силу своих специфических особенностей, ЭМБ и АКЭУ представляют собой транспортные средства с пока еще недостаточным уровнем обеспечения надежности рабочих процессов [159]. Следовательно, существуют определенные риски, связанные с безопасностью. В таких условиях, автомобильные корпорации

должны быть более осторожными, чтобы избежать преждевременного выхода на рынок новых продуктов, которые не обладают соответствующими показателями. Опасности, связанные с высокой энергией хранимой ТАБ известны, но их можно избежать, обеспечивая высокое качество процессов проектирования и производства. Другой специфической особенностью рассматриваемых проектов автомобилей является дополнительные риски, связанные с возможной аварийной ситуацией на дороге, например ДТП, а также отсутствие обеспечения надлежащего технического обслуживания и ремонта. Оценка таких рисков, до сих пор проведена не в полном объеме. Считается, что сервисные службы, должны быть готовы к решению подобных задач. Практика показывает, что сервис в технологическом и инженерном планах, существенно отстает от производства, а соответственно вывод на рынки новых продуктов должен быть обеспечен внедрением целого ряда предупреждающих мер [165].

Следующим, важным вопросом безопасности эксплуатации ЭМБ и АКЭУ является надежность процесса обеспечения энергией [156]. Сегодня, задачи связанные с повышением производства электроэнергии пока еще не рассматриваются в контексте перехода на электрический транспорт. Следовательно, эксперты в области энергетики не в полной мере представляют последствия такого перехода. Ближайшая перспектива развития данной проблемы заключается в постепенном росте нагрузки бытовых сетей, а соответственно усугубления проблем коммунального хозяйства. Можно предположить, что решение данной задачи заключается в использовании интеллектуальных технологий в процессе перераспределения мощности, а также постепенное обновление энергосетей.

Локальным, но достаточно эффективным решением обозначенной проблемы является подготовка предприятий сервисно-сбытовой сети к выполнению соответствующего комплекса работ, начиная от технического обслуживания и ремонта, заканчивая обеспечением текущей эффективности эксплуатации транспортных средств, через зарядку и диагностику.

1.7 Основные проектные решения для электромобилей и автомобилей с КЭУ

Электропривод и ТАБ на экологичном автотранспорте становятся наиболее важными элементами. Именно поэтому наибольшие усилия компонентного кластера направлено на обеспечение высокого уровня качества данных элементов [159]. По сути, большая часть успеха в расширении рынка ЭМБ и АКЭУ, сегодня, зависит от решения проблемы повышения надежности и долговечности функционирования выделенных компонентов. Такое критическое определение данной проблемы не случайно. Традиционно, аккумуляторы не играли ключевую роль в транспортных системах с ДВС. Роль аккумуляторов была ограничена обеспечением: пуска и зажигания ДВС, наружным и внутренним освещением. Остальные ключевые процессы, в течение долгого времени реализовывались бензиновыми или дизельными силовыми агрегатами.

Повышение доли электронных и электротехнических компонентов на борту транспортного средства потребовало повышение выходной мощности генераторной установки, а также улучшение технических параметров ТАБ. Однако, это ни в какое сравнение не идет с процессами перехода транспорта на электрические технологии. По сути, сегодня, требуется переосмысление архитектуры транспортного средства. При существенных ограничениях в массе и габаритах автомобиля, необходимо обеспечить установку системы хранения электроэнергии, а также решить задачу ограничения энергопотребления. Так, например, в традиционных конструкциях автомобилей с ДВС, функцией тормозной системы является собственно обеспечение эффективного торможения транспортного средства. Для ЭМБ и АКЭУ данная функция расширяется за счет реализации электротехнической системы рекуперации энергии [132].

Улавливание пиков электроэнергии в течение короткого промежутка времени, а также ее надежное хранение является функцией ТАБ, но даже современные технологии литий-ионных батарей, используемых на транспорте, ограничены в способности принимать энергию высокого заряда в течение короткого промежутка времени. Существенная часть энергии рекуперации не сохраняется в ТАБ, а из-

лучается в виде тепла. Еще одной проблемой в данном случае является перегрев и деградация современных ТАБ, при воздействии высоких токов. Существуют несколько направлений решения данных проблем: разработка и внедрение электронных систем управления работой ТАБ; использование суперконденсаторов (например, как на автомобиле Supra HV-R Hybrid) для захвата пиков энергии. Однако высокая стоимость таких технологий ограничивает их применение.

1.8 Проблемные области технологий проектирования и производства ТАБ электромобилей и автомобилей с КЭУ

Одним из наиболее важных технологических вопросов требующих скорейшего решения при проектировании и производстве ЭМБ и АКЭУ является повышение плотности энергии ТАБ. Плотность энергии определяется ее количеством, накопленной на единицу массы или объема устройства накопителя. Зависимость между параметрами удельной мощности и плотности энергии ТАБ, для разных технологических решений представлена на рисунке 1.8 [209]. Из анализа рисунка 1.8 видно, что распространенная в настоящее время литий-ионная технология производства ТАБ имеет существенный потенциал развития.

Тем не менее, в долгосрочной перспективе эта технология вполне может быть заменена на другие, которые в настоящее время находятся в стадии исследований и разработок.

Требования по эффективности ТАБ для автомобилей с КЭУ отличаются от соответствующих требований для электромобилей. Для них, значительный объем энергии должен сохраняться для обеспечения транспортных функций в установленном диапазоне параметров. Для АКЭУ существует дополнительная энергетическая поддержка со стороны ДВС. Улучшение технических характеристик ТАБ возможно, однако существуют риски экономического характера. Поэтому главная цель развития батарей для ЭМБ является максимизация плотности энергии, запасенной на единицу объема без существенного удорожания системы.

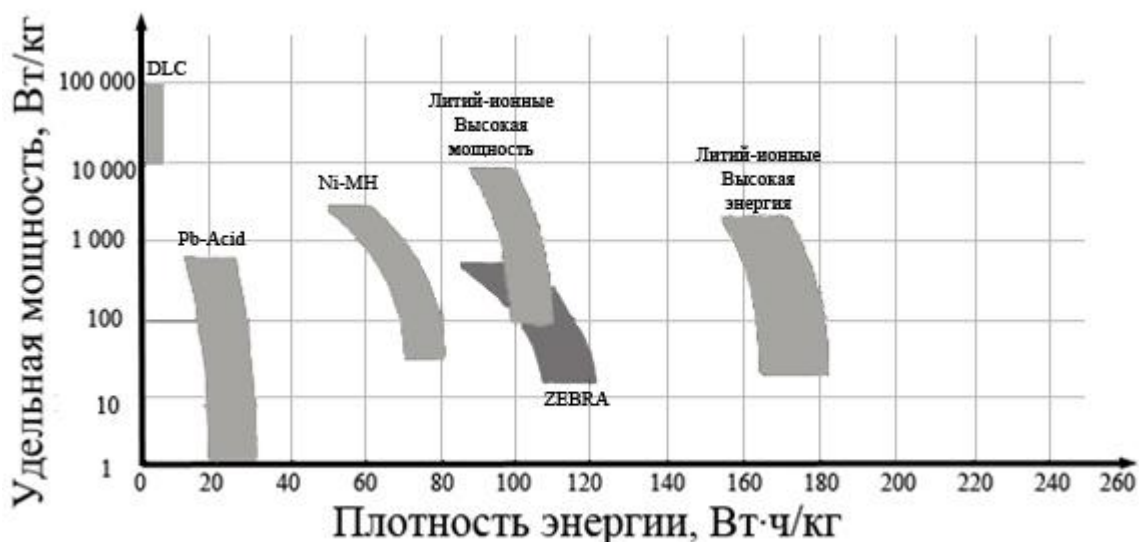


Рисунок 1.8 – Зависимость между параметрами удельной мощности и плотности энергии ТАБ, для разных технологий

Известно, что старые технологии свинцово-кислотных батарей обеспечивают удельную энергоёмкость на уровне $90 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$. Литиево-ионные элементы сегодня обеспечивают удельную энергоёмкость равную $175 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$. Теоретический максимум для таких батарей определяется более чем в $300 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}$. Возможно, что улучшение характеристик ТАБ связано с сочетанием литий-ионных технологий и супер-конденсаторов, при этом может быть достигнута очень высокая удельная мощность с высокой плотностью энергии и большим сроком службы.

Для гибридов, необходимой плотности энергии можно достичь через существующие технологии. Использование лития с высокой теоретической плотностью энергии, в качестве катода, и воздуха в качестве анода представляет собой комбинацию, которая может обеспечить создание ТАБ с высокой плотностью энергии. Однако в настоящее время данная технология находится в экспериментальной области.

Еще одним важным проблемным вопросом остается проблема жизненного цикла ТАБ, а точнее ее долговечность. В условиях перехода ТАБ от режима заряда в область разряда приводит к снижению долговечности. Увеличение количества циклов перезарядки ТАБ, также существенно влияет на ее эффективность.

Следующим проблемным вопросом ТАБ является ее стоимость. При рас-

смотрении данного вопроса необходимо учитывать, что затраты на топливо продолжают расти, а цены на ТАБ уже в ближайшие 20 лет будут уменьшаться с совершенствованием технологии их производства.

Стоимость технологии производства единицы ТАБ для ЭМБ и АКЭУ сегодня находится в диапазоне от 750 до 2000 долл. США. Она в большей степени зависит от применяемых в производстве материалов. Интеграция систем управления или охлаждения с ТАБ практически удваивает эту стоимость. Стоимость китайских литий-ионных батарей значительно ниже, и составляет порядка 400 долл. США, но при этом существенно возрастают риски недостаточного качества и надежности [160].

Обеспечение безопасной эксплуатации ТАБ остается одной из проблемных областей, как для электромобилей, так и для автомобилей с КЭУ [132].

При разработке систем ТАБ необходимо внедрять надежные средства защиты: отключения сепаратора (для предотвращения перегрева); снижение внутреннего давления; сброса давления и теплового прерывания.

Несмотря на то, что потенциал литий-ионных технологий ТАБ не исчерпан, эксперты сходятся во мнении, что уже через 5 лет могут появиться новые разработки в области материаловедения.

Сегодня активно обсуждается вопрос о применении в ТАБ материалов на основе лития, например титаната-лития, или оксида-кремния. Эти новые материалы анода ТАБ обеспечивают более высокий потенциал и лучшие характеристики при низких рабочих температурах, чем традиционный графит (рисунок 1.9).

Два материала, которые в настоящее время активно внедряются в электрические технологии автомобилестроения это: фосфат-лития-железа (ФЛЖ) и титанат-лития (ТЛ). ТАБ на основе ФЛЖ способны обеспечить более 1500 циклов перезарядки, с приемлемым уровнем плотности хранимой энергии. ТЛ имеет гораздо более высокие потенциальные возможности - около 5000 циклов. Однако, меньшая плотность хранимой энергии делает данную технологию более предпочтительной для производства ТАБ для АКЭУ [165].

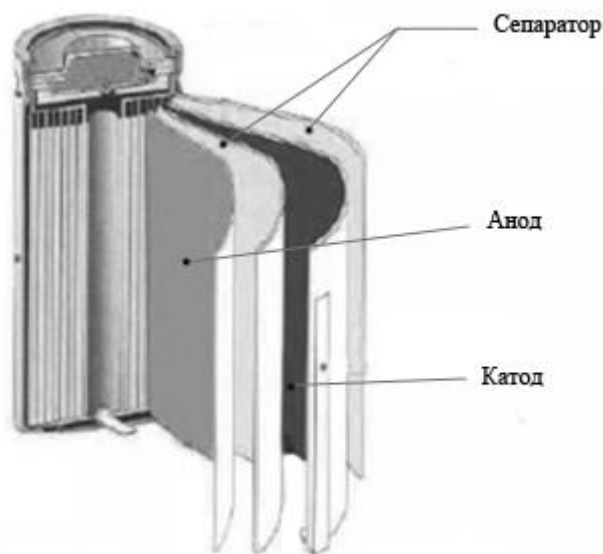


Рисунок 1.9 – Конструкция современной ТАБ электромобиля или автомобиля с КЭУ

Сегодня, многие производители автомобильных ТАБ сосредоточились на развитии технологий применения фосфата лития-железа (ФЛЖ) из-за его высокой стабильности параметров и относительно низкой стоимости. Расчеты показывают, что технологии применения ФЛЖ, в долгосрочной перспективе могут обеспечить производство ТАБ стоимостью 350 долл. США. Однако, такие ТАБ обладают меньшей долговечностью чем используемые сейчас литий-ионные аналоги.

При критическом рассмотрении существующих конструкций батарей в первую очередь следует выделить соответствующие технологии производства катода (рисунок 1.9). ТАБ увеличенной мощности создаются с помощью тонких электродов, но это снижает срок службы, безопасность, и увеличивает расходы. Электродные материалы напыляются на тонкую металлическую подложку, которая также служит в качестве коллектора тока. Исследование анодных материалов показывает существенный потенциал развития технологий на основе оксида-олова, в сравнении с применяемыми в настоящее время графитовыми аналогами. Однако существуют проблемы технологической стабильности в производстве таких материалов для массового производства автомобилей. В Японии ведутся разработки серебряных анодов ТАБ данный вариант является более дорогим. Сегодня, лиде-

рами в области разработок технологий производства анодов и катодов ТАБ являются компании DuPont, 3M и IBM. Однако, технологии производства анода и катода ТАБ – это всего лишь небольшая доля в цепочке создания стоимости современных батарей. Большую значимость в плане разработки и производства ТАБ занимает сепаратор. Сепараторы литий-ионных ТАБ (рисунок 1.9), необходимы для обеспечения надежного хранения энергии высокой плотности. Их изготавливают из слоистых полиолефинов с пористостью 50%. Сепараторы выполняют две функции: надежное позиционирование положительных и отрицательных электродов, а также защита ТАБ в случае перегрева. При повышении температурного режима работы батареи происходит закрытие пор полимерной сетки, тем самым ограничивается цепь по току и уменьшается рост температуры. Таким образом, обеспечивается безопасная эксплуатация ТАБ, однако оплавление сепаратора при высоких температурах приводит к необходимости замены батарей и дорогостоящему ремонту транспортного средства. Компании BASF и Celguard проводят исследования в области новых материалов для производства сепараторов [162].

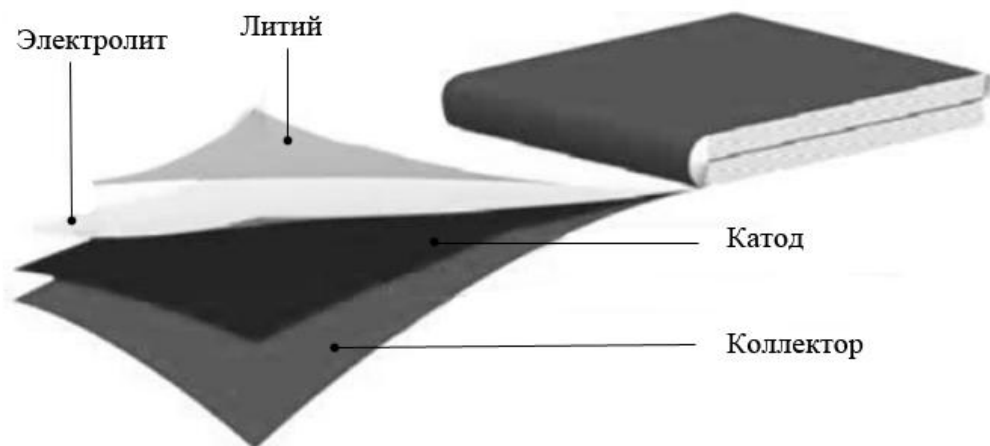


Рисунок 1.10 – Типичная конструкция литий-ионной батареи

В современных ТАБ, в качестве электролита обычно используется раствор литиевой соли в органическом растворителе. Типичная конструкция литий-ионной батареи представлена на рисунке 1.10. Большинство современных солей представляют собой соединения фтора, который при относительной безопасности эксплуатации имеет приемлемые технико-экономические показатели. Эффектив-

ность технологических решений в области создания ТАБ для ЭМБ и АКЭУ иллюстрирует рисунок 1.11.

Большинство автомобильных конструкций ТАБ предусматривают реализацию батарей в виде сот или клеток, которые имеют цилиндрическую (рисунок 1.9) или призматическую формы. Силовой каркас литий-ионных батарей первоначально изготавливался из нержавеющей стали, хотя в последнее время этот материал заменили алюминием, который имеет меньший вес и стоимость. Материал каркаса должен быть достаточно жестким, чтобы обеспечить выполнение эксплуатационных требований.

Необходимость обеспечения безопасности литиево-ионных батарей требует обязательного внедрения системы управления ограничивающей перезарядку. Стоимость системы управления повышает общую стоимость батарей, а с учетом, того, что конструкция ТАБ электромобиля или автомобиля с КЭУ включает в себя от 4 до 8 сот, усложняется и система управления контролирующая процессы зарядки и разрядки.

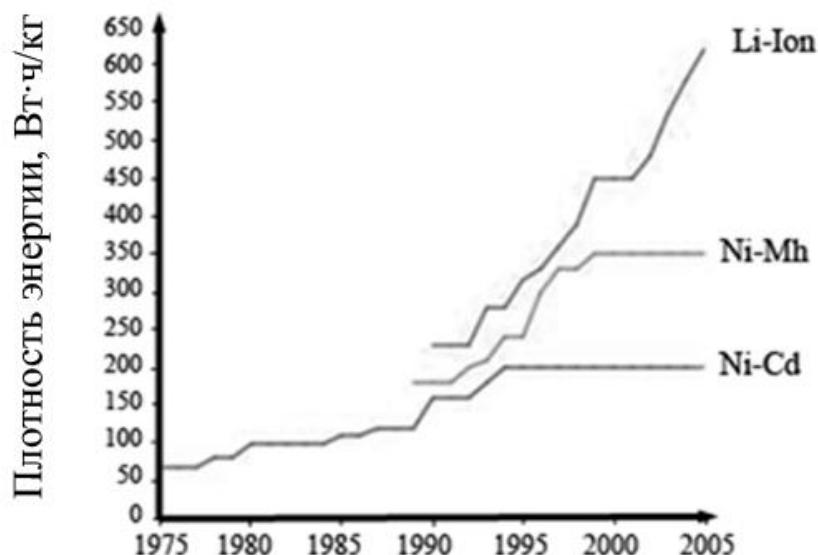


Рисунок 1.11 – Исторические достижения в области повышения энергоэффективности ТАБ

1.9 – Проблемные области технологий проектирования и производства тяговых электродвигателей для электромобилей и автомобилей с КЭУ

Тяговые электродвигатели ЭМБ и АКЭУ выполняют функции забора энергии из ТАБ и обеспечение движения транспортного средства. В отличие от традиционно используемых в автомобилестроении электростартеров или электроусилителей рулевого управления, тяговые электродвигатели должны обладать большей мощностью и как следствие большими массогабаритными характеристиками.

Автомобильные тяговые электродвигатели (рисунок 1.12) обладают рядом достоинств по сравнению с ДВС. Двигатели внутреннего сгорания, как правило, не в состоянии обеспечить достаточный крутящий момент на низких скоростях. Около 10% мощности ДВС необходимо для поддержания постоянной скорости движения равной 50 км/ч, в то время как 90% мощности используется только в режимах ускорения или движения на высокой скорости.

Конструкция тягового электродвигателя обеспечивает максимальный крутящий момент уже в момент старта автомобиля, что позволяет снижать его номинальную мощность. Электродвигатели обеспечивают необходимый крутящий момент в широком диапазоне частоты вращения ротора.



Рисунок 1.12 – Общий вид тягового электродвигателя

Хотя электродвигатели нашли широкое применение в современной технике, необходимость значительного повышения параметров мощности, для обеспечения требований автомобильного производства, является сравнительно новой зада-

чей. Тяговые электродвигатели, используемые на транспорте, работают на высоких частотах вращения и нуждаются в эффективном охлаждении.

Элементы электродвигателя нагреваются не только из-за потерь в активных его частях, но и из-за соседства с нагревающимися элементами трансмиссии. При эксплуатации транспортного средства температура должна регулироваться, с целью поддержания требуемых выходных электромеханических характеристик, а также для защиты от теплового повреждения электродвигателя и рядом установленных компонентов. В автомобильных тяговых электродвигателях из-за ограниченности габаритов и высоких электромагнитных нагрузок воздушное охлаждение малоэффективно и в большинстве случаев неприемлемо. Такие системы требуют жидкостного охлаждения.

Компания Remy International, занимающаяся разработкой и производством тяговых электродвигателей на постоянных магнитах (рисунок 1.13) для GM и BMW, а также компания Mercedes самостоятельно занимающаяся разработкой таких компонентов, подчеркивают важность охлаждения электродвигателей на высокоскоростных режимах работы.

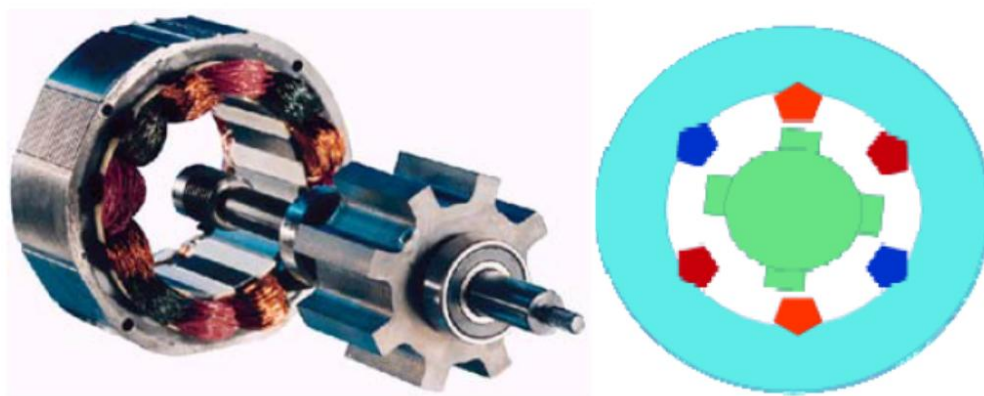


Рисунок 1.13 – Конструкция тягового электродвигателя на постоянных магнитах

Учитывая ключевую роль электропривода в транспортных системах, производители автомобильных компонентов приступили к разработке новых конструкций электродвигателей с повышенными мощностными характеристиками. Однако, в отличие от электродвигателей промышленного и бытового применения, в

конструкциях тяговых электродвигателей, для обеспечения соответствующих характеристик, устанавливаются элементы активной зоны из редкоземельных материалов, таких как лантан, неодим, диспрозий и тербий, из которых изготавливаются постоянные магниты.

Редкоземельные элементы имеют высокую стоимость, из-за значительной трудоемкости добычи ресурсов. Любой технологический прорыв в замещении добываемых элементов на синтезированные в промышленных условиях может снизить стоимость электродвигателей на 25%. Кроме того, большая часть мировых запасов редкоземельных металлов сосредоточена на территории Китая. Формируемая при этом стратегическая зависимость промышленных центров от ограниченного объема добываемых ресурсов способна снизить привлекательность ЭМБ и АКЭУ [157].

Исторически, в плане реализации электропривода, конструкция электромобилей менялась. На ранних разработках использовался один мощный электродвигатель привода. Сегодня на автомобилях, в основном, устанавливаются два так называемых мотор – колеса. Электродвигатели подключаются напрямую к колесному диску. Существуют варианты полного привода электромобилей, где используются четыре тяговых электродвигателя.

В отличие от широкого спектра технологий производства ТАБ, соответствующие инструменты проектирования и производства электродвигателей ограничены. По сути, классификация технологических возможностей производства тяговых электродвигателей заключается в реализации конструкций электродвигателей постоянного и переменного тока [162, 165].

Классификатор тяговых электродвигателей постоянного тока устанавливаемых на электромобили включает: тяговый электродвигатель постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и тяговый электродвигатель постоянного тока с электромагнитным возбуждением.

Одним из недостатков двигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов является существенная пульсация крутящего момента. Данный недостаток устраняется увеличением полюсов обмотки статора. В результате

кривая крутящего момента сглаживается, средний крутящий момент возрастает, двигатель на разных режимах работает более плавно. Другим способом увеличения крутящего момента и частоты вращения двигателя является увеличение тока, подаваемого на обмотку статора. К достоинствам рассматриваемой конструкции электродвигателей является простота исполнения.

Тяговый электродвигатель постоянного тока с электромагнитным возбуждением обеспечивает более плавное генерирование крутящего момента. Преимуществами такого электродвигателя являются высокая надежность и упрощенный алгоритм управления скоростными режимами. К недостаткам таких электродвигателей можно отнести высокую трудоемкость обслуживания, связанную с необходимостью организации периодических замен щеток и пружин, а также чистки и замены коммутаторов щеточно-коллекторного узла (ЩКУ).

Несмотря на отмеченные выше недостатки тяговых электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов, именно они нашли наиболее широкое распространение в проектировании и производстве ЭМБ и АКЭУ. Бесщеточная конструкция электродвигателей обеспечивает более эффективную передачу энергии на колесо, повышенную долговечность эксплуатации. Кроме того, такие электродвигатели практически не требуют технического обслуживания. Недостатками тягового электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов являются высокая стоимость и необходимость реализации сложных алгоритмов управления.

Новые конструктивные и технологические решения для тяговых электродвигателей в бесщеточном исполнении обозначены фирмой Hredzak. Традиционно привод электромобилей обеспечивался через карданный вал или реализовывался непосредственно в конструкции колеса. Решение компании Hredzak заключается в создании технологии производства двухсторонней конфигурации статора электродвигателя, которая привлекательна тем, что на ротор машины устанавливается непосредственно диск колеса автомобиля (рисунок 1.14). Это приводит к уменьшению массы колеса и общих габаритов системы привода. Однако, недостатком конструкции считается то, что вследствие неровностей дорожного покрытия происходит смещение ротора относительно статора, вызывая пульсации кру-

тящего момента электрической машины [209].

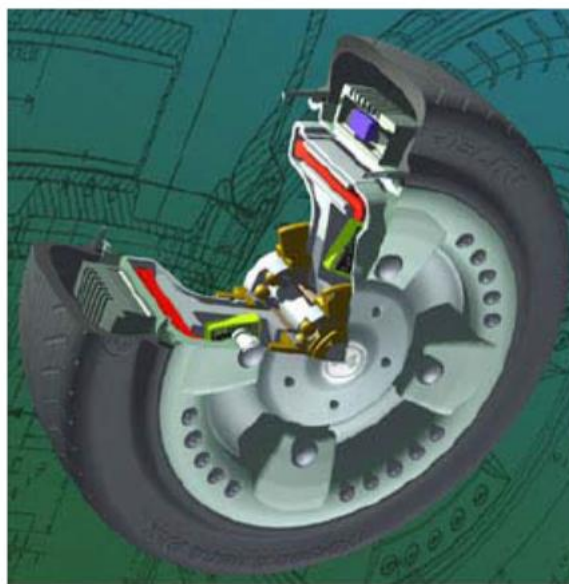


Рисунок 1.14 – Тяговый электродвигатель Hredzak

Решение этой проблемы заключается в модуляции тока электродвигателя и обеспечение контроля крутящего момента с помощью соответствующей системы управления.

Тяговые синхронные электродвигатели переменного тока имеют ряд преимуществ в сравнении с электродвигателями постоянного тока: отсутствие скольжения ротора относительно поля статора; возможность более точной регулировки частоты вращения ротора и т.д.

Одним из лидеров в области разработки и производства мотор-колес на основе синхронных двигателей переменного тока является компания Mitsubishi. Соответствующие технологии применяются как в изготовлении электромобилей, так и автомобилей с КЭУ. Мотор-колесо Mitsubishi позволяет обеспечивать регулировку крутящего момента и тормозного усилия независимо на каждое колесо без необходимости реализации приводного вала или других сложных механических компонентов. Система привода расположена внутри самого колеса, при этом обеспечивается оптимизация компоновки конструкции и снижение массы устройства (рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 – Мотор-колесо автомобилей Mitsubishi

Проблемным вопросом в конструкции мотор-колеса Mitsubishi является необходимость решения задачи по интеграции классической тормозной системы в ограниченном пространстве, а также организация процесса ее обслуживания и регулировки. Конструкция электропривода Mitsubishi представлена на рисунке 1.16.



Рисунок 1.16 – Конструкция электропривода колес Mitsubishi

Британской компанией PML Flightlink разработан интегрированный комплекс, реализующий функции электропривода колес, электрогенератора и тормозной системы. Устройство, имеет лучшие массогабаритные и энергетические характеристики в сравнении с Mitsubishi и включает в себя электронную систему управления двигателем. Система управления реализует переход от режима электродвигателя в режим генерации электроэнергии. Интеллектуальное программное

обеспечение системы управления обеспечивает оптимизацию производительности автомобиля.

Перспективными направлениями развития процессов проектирования и производства мотор-колеса являются: разработка энергоэффективной конструкции электродвигателя, включая силовую и управляющую электронику; интеграция в конструкцию тормозной системы; разработка управляющей системы передней подвески; реализация функции теплоотвода.

Конструкция обратимого тягового трехфазного электродвигателя переменного тока состоит из статора с обмотками расположенного внутри машины, внешнего ротора с постоянными магнитами и системы жидкостного охлаждения. Среди преимуществ данных конструкций электродвигателей выделяются: отсутствие необходимости в обеспечении дополнительных приводных механизмов; номенклатурное расширение транспортных средств, на которых можно установить данное устройство; оптимальные массогабаритные параметры.

Как было отмечено ранее, основным недостатком мотор-колеса является дополнительная масса, которую оно добавляет к колесному диску автомобиля, что оказывает влияние на комфорт и курсовую устойчивость при движении. Для преодоления данного недостатка компания Bridgestone разработала технологию управления неподрессоренной массой автомобиля, которая заключается в использовании системы поглощения вибраций, когда сами электродвигатели обеспечивают функции гасителей вибрации. То есть собственные вибрации электродвигателей компенсируют вибрации от дороги и шин, что улучшает стабильность и комфорт движения. Bridgestone доказывает успешность такого подхода, так как управление неподрессоренной массой обеспечивает улучшение характеристик надежности и долговечности мотор-колеса.

Широкий спектр концептов автомобилей были разработаны с использованием различных конструкций мотор-колеса: PML Flightlink в 2006 г.; Mitsubishi MIEV в 2005 г.; Siemens VDO в 2006 г.; Heuliez в 2008 г.; ZAP-X в 2007 г.; Peugeot BB1 в 2009 г.

Компания Peugeot совместно с Michelin разработала мотор-колесо, устанавли-

ливаемое в качестве заднего привода на автомобилях Peugeot BB1 (рисунок 1.17). В Peugeot BB1 устанавливается бесколлекторный тяговый электродвигатель, имеющий систему гашения вибрации (рисунок 1.17). Несмотря на высокую стоимость такого электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов, его применение в системе привода более предпочтительно, так как интеграция мотор-колеса и системы управления вибрацией в рамках привода с электромагнитным возбуждением, не рациональна, в первую очередь из-за увеличения габаритов конструкции.



Рисунок 1.17 – Конструкция мотор-колеса совместной разработки Peugeot и Michelin

Энергоэффективность конструкции современных мотор-колес является одним из самых больших преимуществ прямого привода реализуемого на ЭМБ и АКЭУ. Причем, такие технологии существенно расширяют потенциальные возможности развития других систем автомобиля, например, таких как система активной безопасности, в функции которой могут быть внедрены алгоритмы управления мотор-колеса. Кроме того, на современных автомобилях, благодаря электроприводу, появляется возможность устранения классических конструкций коробки переключения передач (КПП), дифференциалов, приводных валов и осей. Ну, и конечно, главным преимуществом электрических технологий транспортных средств является, бесспорно, меньшее влияние на окружающую среду [132, 158].

Однако, одной из наиболее важных проблем в реализации современных конструкций привода ЭМБ и АКЭУ является проблема обеспечения качества и надежности соответствующей компонентой базы [159]. Необходимо создать технологии производства, обладающие высокими показателями воспроизводимости электромеханических преобразователей (ЭМ): по точностным показателям; эксцентриситету ротора и статора; весу и т.д. Уже сейчас, экспертным сообществом отмечаются проблемные вопросы эксплуатации электромобилей, связанные с весовым дисбалансом мотор-колеса. Примером решения данной проблемы является опыт компании Michelin разработавшую для электродвигателя привода технологию Active. Интегрированная система управления приводом мотор-колеса, для данной системы, осуществляет сравнение и оптимизацию весового баланса колес. В условиях значительной массы неподрессоренных компонентов автомобилей (до 40 кг), значимость такой системы управления увеличивается (рисунок 1.17). Данный опыт, реализуется на электромобиле Renault Clio [209],

Ранее, при классификации конструкций тяговых электродвигателей, были выделены конструкции обратимого типа. У экспертов компании Mitsubishi Motors существует устойчивое мнение, что именно эти технологии определяют дальнейшую перспективу развития экологического транспорта. Причиной чего является снижение весогабаритных параметров устройства и повышение эффективности передачи вращения на колесо.

Размещение системы привода колес предоставляет конструктору гораздо больше возможностей в плане развития соответствующих компоновочных решений, чем, например размещение привода от классического силового агрегата. Освобождаемая при этом площадь нижней части кузова автомобиля может быть использована более эффективно за счет размещения элементов ТАБ. Использование обращенной машины в качестве привода, за счет уменьшения количества механических посредников в системе, позволяет увеличить максимальный крутящий момент. Так, как рассматриваемые конструкторские решения представляют собой продукты развития соответствующих электрических технологий, то при этом обеспечивается наиболее гармоничная интеграция электронных компонентов кон-

троля и управления в соответствующие исполнительные устройства. Расширяемая при этом оптимизационная составляющая характеристик автомобиля определяется параметрами крутящего момента и тормозного усилия на каждом колесе, что позволяет повысить эффективность эксплуатации транспортного средства.

Компанией Honda в 2007 г. на Токийском автосалоне, впервые был представлен прототип автомобиля на топливных элементах FCX, с задним приводом от электропривода типа мотор-колесо (рисунок 1.18). Однако впоследствии компания перешла на использование более традиционных конструкций тяговых электродвигателей из-за возникших проблем с теплоотводом.



Рисунок 1.18 – Электропривод компании Honda

Одним из удачных конструкторских решений является мотор-колесо компании Protean (рисунок 1.19). Электродвигатель имеет встроенный инвертор, интегрированную управляющую электронику, программный контроллер.



Рисунок 1.19 – Конструкция мотор-колесо фирмы Protean

Такая комплексная система электропривода и управления получила название системы с распределенной архитектурой. Здесь, отдельные компоненты объединены общей информационной сетью, что позволяет повысить показатели надежности и безопасности функционирования транспортного средства.

В случае отказа или некорректной работы компонентов системы, электропривод снижает производительность работы, что не приводит к полному отказу всего устройства. Контроллер управления каждого мотор-колеса интегрируется соответствующей управляющей системой автомобиля, таким образом, появляется возможность для организации процесса управления всем транспортным средством с учетом многообразия эксплуатационных режимов. Кроме управления, функцией встроенного микропроцессорного контроллера является оптимизация рекуперативного торможения, осуществляемое через взаимодействие с внешним модулятором тормозов. Когда водитель нажимает на педаль тормоза, система определяет возможность торможения с использованием электродвигателя, при выполнении данного условия, в энергетической системе происходит рекуперация энергии. В случае отказа в выполнении условия, контроллером обеспечивается управляющее воздействие и активизируется фрикционная тормозная система. Кроме этого, разработанная Protean система обеспечивает совмещение с ABS автомобиля. В результате получаем комплексный интегрированный компонент, имеющий очевидные преимущества перед аналогами.

1.10 Ресурсное обеспечение производства и эксплуатации электромобилей и автомобилей с КЭУ

Мировой спрос на редкоземельные металлы, по оценкам специалистов, в ближайшие 5 лет превысит 40000 т. в год. В случае, если в течение данного промежутка времени не будут найдены технологии по синтезу аналогичных материалов в промышленных масштабах, то проблема производства ЭМБ и АКЭУ будет усугубляться ресурсными ограничениями уже на стадии производства компонентов [156].

Автомобиль с КЭУ Toyota Prius заслужил доверие американских потребителей, и занимает в своем сегменте около 70% рынка. Он реализован на основе электропривода. Сегодня в каждом тяговом электродвигателе Prius содержится примерно 1 кг неодима, каждая ТАБ содержит примерно от 10 до 15 кг лантана [209].

Как было отмечено ранее, основные разведанные запасы редкоземельных металлов сосредоточены на территории Китая, в котором, в настоящее время, действует государственная программа по обеспечению сохранности редкоземельных материалов для обеспечения собственных нужд. Естественно происходит ограничение поставок на экспорт.

Для реализации технических задач, в качестве основного материала аккумуляторных батарей, активно используется литий. Интересно, что некоторыми экспертами отмечается проблема дефицита данного материала. При всем при этом, уже сейчас существует огромный парк технических устройств находящихся на разных этапах жизненного цикла, где используется литий. По общим оценкам, объемы запасов лития превышают соответствующие объемы золота, платины, йода, серебра и составляет 28400000 т. лития или 150000000 т. эквивалентного материала – карбоната-лития. Таким образом, при текущем мировом спросе, составляющем около 23000 т. лития или 122000 т. эквивалента, существуют достаточные запасы данного материала. Здесь присутствует другая проблема, как только

на территории суверенных государств обнаруживаются запасы соответствующего материала, вводятся меры ограничительного характера, что способствует росту мировых цен. Такую картину можно наблюдать на примерах Чили или Боливии [158].

Другой, очевидной проблемой, когда речь заходит о перспективах развития экологического транспорта, является проблема обеспечения инфраструктуры обслуживания и ремонта [167].

Важнейшим элементом расширения использования электромобилей и автомобилей с КЭУ является способность энергосети к надежной зарядке ТАБ. В условиях сложившихся генерирующих мощностей, требуется дополнительный энергетический прирост, для обеспечения прироста нагрузки. Тем не менее, существуют исследования показывающие, что при сохранении текущих темпов перехода транспорта на электрические технологии, дополнительные мощности, необходимые для удовлетворения спроса на электроэнергию не так уж велики и составят примерно 1,5% к 2030 г., что продемонстрировано на рисунке 1.20.

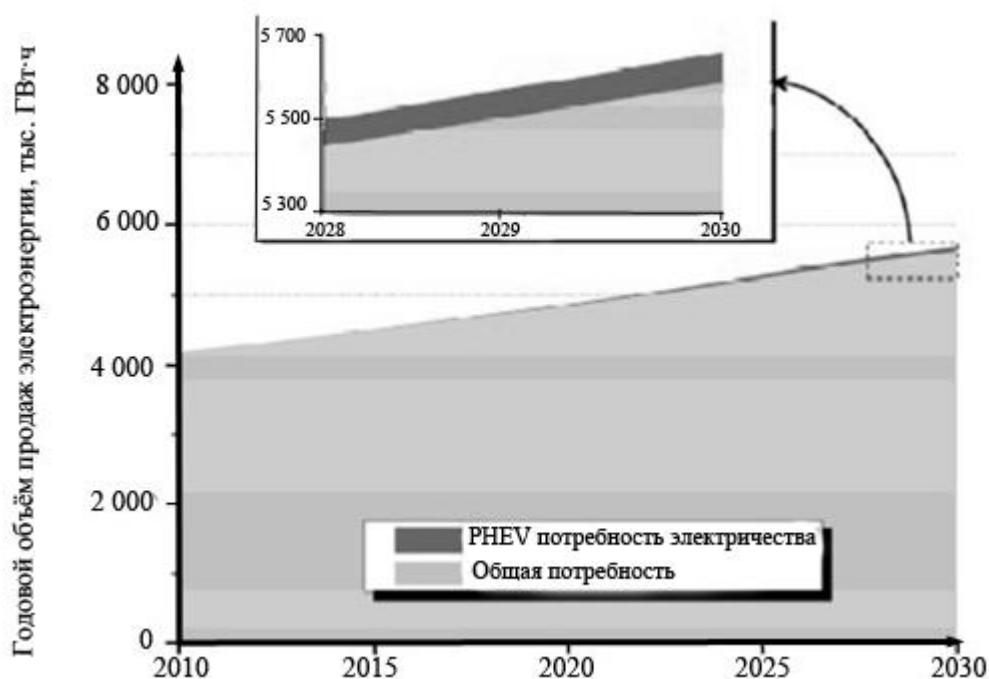


Рисунок 1.20 – Прогноз энергетического прироста вызванного развитием электрических технологий на транспорте

Скорее всего, в данных условиях, актуализируется другая проблема – обес-

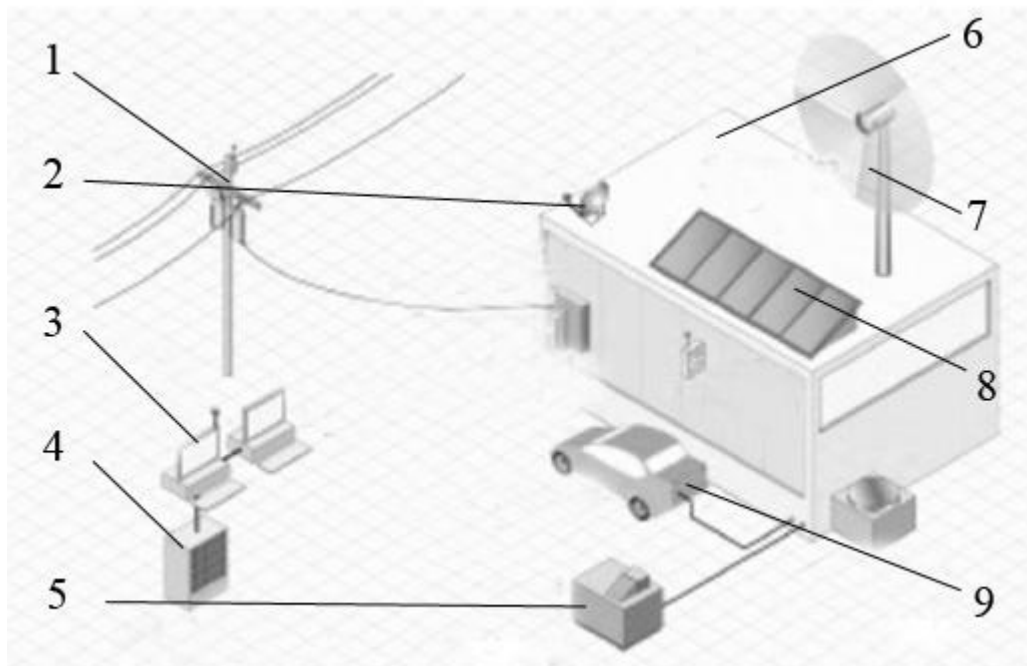
печение надежности процесса зарядки ТАБ электромобилей в пиковые часы работы энергосети. Меньшей по значимости, но важной для потребителей проблемой является зарядка ТАБ автомобиля по приемлемой цене. В США, Западной Европе, да и в России действует сетка тарифов на электроэнергию, в зависимости от времени суток. Понятно, что решение этой проблемы должно заключаться в повышении степени информированности потребителей о достоинствах и недостатках реализации процесса обслуживания транспортного в определенные часы. Решение же основной проблемы обеспечения надежной зарядки ТАБ в пиковые часы, должно проводиться на основе внедрения так называемых интеллектуальных технологий в энергетические распределительные системы [156].

В настоящее время разрабатываются локальные инструменты, при расширении использования которых, можно существенно изменить баланс решения проблемы. Например, на рисунке 1.21 представлена схема организации процесса обслуживания электромобилей, на базе целого энергетического комплекса созданного с использованием технологий возобновляемых источников электроэнергии.

Комплекс (рисунок 1.21) работает по принципу стабильного обеспечения электроэнергией транспортных средств в любой момент времени. То есть, при невозможности надежной зарядки ТАБ через традиционные энергетические сети, реализуется алгоритм зарядки с помощью генерирующих устройств: солнечная батарея, ветряной генератор. В случае повышения нагрузки на сервисный комплекс, предусмотрена возможность замены разряженной ТАБ на специально подготовленную и хранимую в складских условиях батарею. Таким образом, решается проблема надежного обеспечения эксплуатационных параметров электромобилей.

Интеллектуальные энергетические сети – это сравнительно новое понятие, которое в приложении к транспортным технологиям должно обеспечивать оптимальное перераспределение электроэнергии исходя из существующего спроса и предложения в разных географических регионах. К числу концепций реализующих данное направление можно отнести так называемую концепцию «Умный го-

род» (рисунок 1.22) [165, 167].

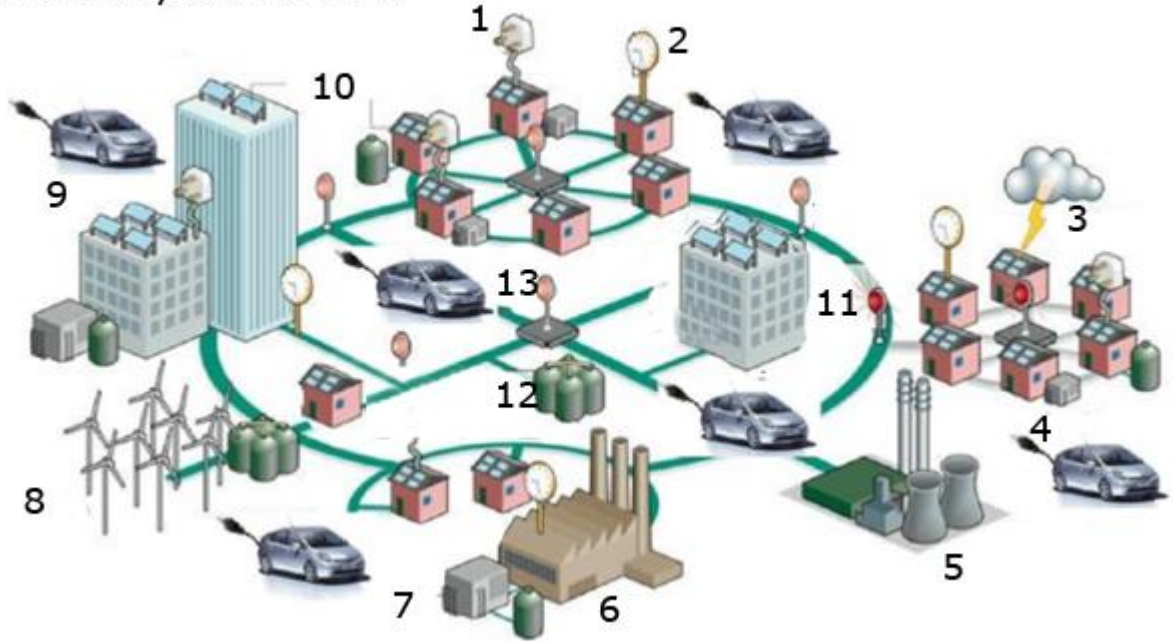


1 – традиционная энергетическая сеть; 2 – система спутникового Интернета; 3 – система динамического контроля энергетической среды; 4 – интеллектуальная система реализации электроэнергии; 5 – система питания/забора электроэнергии выработанной в ЭМБ и АКЭУ; 6 – система замены ТАБ; 7 – система ветряного генерирования электроэнергии; 8 - комплекс солнечных батарей; 9 – ЭМБ или АКЭУ.

Рисунок 1.21 – Энергетическая система обеспечения ЭМБ и АКЭУ:

Анализ модели (рисунок 1.22) показывает, что в условиях реализации системы интеллектуальных распределительных энергетических сетей должно быть гармонизировано решение довольно сложных вопросов, в рамках единого комплекса. В настоящее время системами управления энергетических сетей реализуются алгоритмы переноса мощностей в зависимости от глобального изменения спроса на электроэнергию. Представленная модель, по сути, отражает необходимость более гибкого управления энергораспределением и требует разработки новых алгоритмов управления, когда накопление потребительских запросов на местном уровне, должно переводить систему в соответствующий режим обеспечения.

Интеллектуальная сеть



1 – комплекс интеллектуальных приборов коммутации; 2 – система надзора и контроля за энергетической средой; 3 – комплекс управления в кризисных ситуациях; 4 – система обеспечения эксплуатации ЭМБ и АКЭУ в автономном режиме; 5 – традиционные генерирующие мощности города; 6 – городской промышленный парк; 7 – сервисный комплекс ЭМБ и АКЭУ; 8 – альтернативные генерирующие мощности города на основе ветряных станций; 9, 10, 11 – альтернативные генерирующие мощности на основе солнечных батарей; 12 – система медленных полос движения с подзарядкой ТАБ ЭМБ и АКЭУ в городской среде; 13 – комплекс станций быстрой зарядки ТАБ ЭМБ и АКЭУ

Рисунок 1.22 – Модель концепции «Умный город»:

С другой стороны, ряд аналитиков прогнозируют, что являясь как потребителями, так и источниками электроэнергии ЭМБ и АКЭУ могли бы делать свой энергетический вклад в работу всей сети. Но при этом, в настоящее время, не в полной мере разработаны инструменты расчета и возмещения со стороны энергосетей затрат связанных с передачей электроэнергии от транспортного средства в сеть. Для эффективной реализации концепции «Умный город», необходимо решить ряд задач: создание системы двунаправленного силового интерфейса – для обеспечения функции приема и передачи электроэнергии из сети к автомобилю и обратно; беспроводной доступ в Интернет для всех транспортных средств и глобальное позиционирование – для полного контроля за передвижением транспортных средств с целью оптимизации управления и реализации инструментов про-

гнозирования локального спроса на электроэнергию; создание системы двусторонней системы учета электроэнергии на розничном уровне; разработка интеллектуальных алгоритмов управления с учетом многофакторности решаемой проблемы.

Важным вопросом, при обеспечении эффективности обслуживания ЭМБ и АКЭУ, является уровень согласованности принятых стандартов в отраслях так или иначе связанных с электрическими технологиями на транспорте. С учетом того, что электрическое напряжение в бытовых сетях даже в развитых странах отличается, напрашивается вывод о необходимости решения задачи стандартизации с целью обеспечения единообразия как минимум некоторых особенностей транспортных средств и инфраструктуры, с точки зрения эксплуатации. По обозначенному комплексу проблем, в настоящее время, разрабатываются и внедряются на межгосударственном и межкорпоративном уровнях соответствующие стандарты и протоколы. Например, в Северной Америке, Инженерной Ассоциацией проводится работа, направленная на Анализ параметров и характеристик электромобилей и автомобилей с КЭУ, которые нуждаются в стандартизации. Список компаний участвующих в разработке требований объединяет лидеров мирового автомобилестроения: GM, Chrysler, Ford, Toyota, Honda, Nissan [165].

В качестве примера одного из результатов работы Инженерной Ассоциации является унифицированная система подключения электромобилей к блокам подзарядки (EVSE), реализуемая с помощью четырех различных принципиальных решений (рисунок 1.23): внутренний блок EVSE; блок EVSE установлен на стене или постаменте; на стене или постаменте установлен блок DC быстрого зарядного устройства; замена батареи DC с быстрым зарядным устройством [167, 209].

Важным аспектом, влияющим на расширение географии использования электромобилей является разработка и реализация принципов обеспечения так называемой «быстрой» (в течение не более 15 мин) зарядки ТАБ, при одновременном расширении пунктов сервиса, предоставляющих данную услугу.

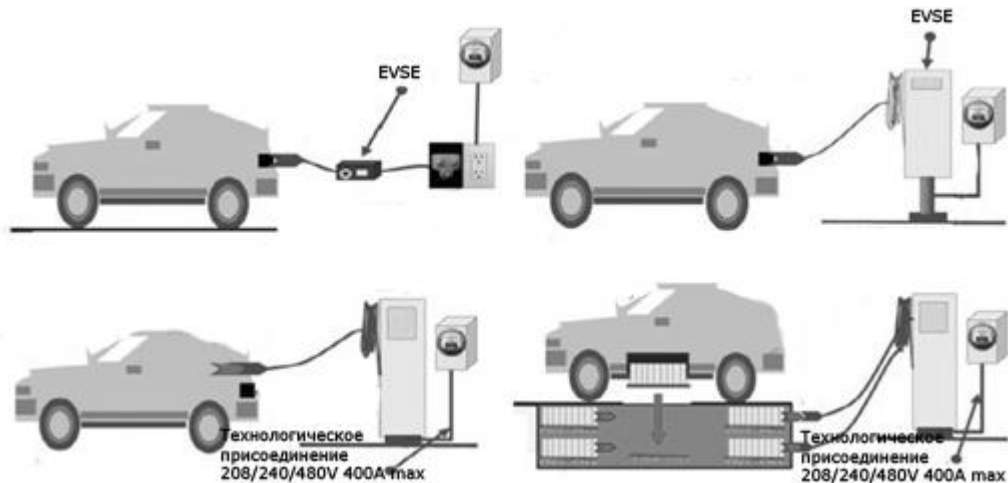


Рисунок 1.23 – Стандартизированные принципы зарядки ТАБ электромобилей

Уже сейчас Европейской ассоциацией автопроизводителей (АСЕА) объявлено о начале работ по созданию стандартизированной по единым принципам сети заправочных станций в странах Еврозоны. Комплекс соответствующих мероприятий поделен на фазы:

фаза 1 – создание единого разъема для подключения к зарядному блоку;

фаза 2 – адаптация компонентной отрасли Европы под единый перечень стандартов разработки и производства автокомпонентов. Начало действий 2017 г.

В настоящее время, большой интерес к данной программе уже проявили не только Европейские и Североамериканские автомобильные концерны, но и Японские, Южнокорейские и Китайские корпорации.

Известно о программе развития сервиса в КНР, согласно которой, в ближайшие 2 года в Пекине будет построено 75 зарядных станций, при этом уже сейчас во всех крупных городах работает около 100 таких сервисов [167].

В 2010 г. в городе Сан-Хосе, штат Калифорния (США), состоялась конференция по проблемам развития электрических технологий на транспорте. Участниками конференции были выделены два основных стандартных направления обеспечения энергией автомобилей: домашняя и сервисная зарядные станции. При этом важным аспектом определяющим развитие технологий является обеспечение сервиса не только для легковых автомобилей, но и для среднетоннажного коммерческого транспорта.

Интересен опыт некоторых стран в развитии экологических видов транс-

порта, с точки зрения ресурсного обеспечения эксплуатационных этапов жизненного цикла. Согласно официальным источникам в планах Дании до 2020 г. обеспечить выработку до 50% производимой электроэнергии на основе возобновляемых источников. Таким образом, государство, через реализацию энергетических программ, а также за счет активного внедрения электромобилей, планирует снижение импорта энергоносителей.

Отдельным вопросом, нуждающимся в рассмотрении, является технология индуктивной зарядки, разработанная в 1893 Николой Тесла. Его работа была посвящена проблеме развития беспроводного освещения. По сути, она определила современное направление развития технологий, которые могут быть использованы при реализации ЭМБ и АКЭУ. Индукционная зарядка не реализуется путем непосредственного воздействия на ТАБ транспортного средства. Система состоит из двух частей:

первая – располагается на стороне зарядного устройства и представляет собой трансформатор, разделенный на две части. Первичная обмотка подключена к сети переменного тока.

вторая – располагается на автомобиле. Вторичная обмотка находится в изолированном модуле и обеспечивает питание ТАБ.

Таким образом, при движении, в условиях отсутствия физического контакта, реализуя закон электромагнитной индукции, осуществляется подзарядка аккумуляторов автомобилей.

Уже сейчас, например, в Новой Зеландии разработаны индуктивные системы передачи мощности. В Европе начинается процесс разработки и внедрения так называемых «медленных» полос движения, которые обеспечивают функцию индуктивной зарядки электромобилей [156].

Существует ряд неоспоримых преимуществ технологии индукционной зарядки автомобилей: упрощение инфраструктуры обеспечения стационарных режимов зарядки ТАБ; постоянное подключение автомобиля к информационной сети создает возможности для оптимизации транспортных потоков, повышения уровня безопасности и безаварийности на дорогах; повышение уровня комфорта

при эксплуатации транспортных средств за счет реализации систем быстрого Интернета.

Причем, в последнем случае, можно говорить о техническом прорыве в области транспорта, который определяется: реализацией функций мониторинга; диагностикой и интерактивным обслуживанием, маршрутизацией и предупреждением столкновений; селективным управлением движения автомобилей.

1.11 Перспективы развития рынка электромобилей и автомобилей с КЭУ

Еще сравнительно недавно, перспективы развития ЭМБ и АКЭУ рассматривались весьма скептически. Основные проблемы в реализации электрических технологий на транспорте были связаны с невозможностью обеспечить минимальные требования потребителей эксплуатирующих автомобили даже в городских условиях. Низкий интервал пробега между циклами перезарядки ТАБ, невысокий уровень динамики, отсутствие необходимой инфраструктуры – это только часть проблем которые необходимо решить, прежде чем выпустить на рынок электроавтомобили и автомобили с гибридной силовой установкой. Сегодня, происходит изменение в сознании экспертного сообщества в части развития соответствующих технологических направлений.

Первичный импульс, определивший новый этап развития экологического транспорта, в середине 20 века обозначил два основных направления электрических технологий: электромобили и автомобили с КЭУ. Текущее понимание необходимости дальнейших разработок в данной области определяется дополнительными аспектами: рост цен и ограничение добычи энергоресурсов.

Таким образом, уже сейчас можно говорить о заложенном фундаменте в вопросах актуализации и развития электрических технологий на транспорте. В развитых странах работают специализированные экспертные группы, целью которых является изменение сознания общества в понимании экологических проблем и роли электротранспорта в их решении.

Наметившийся в последние десятилетия технический прорыв в области

электрических технологий транспорта, обеспечивает формирование оптимистического сценария развития автомобилестроения в соответствующем тренде.

Все обозначенное выше, является своего рода двигателем процесса развития ЭМБ и АКЭУ. Но при этом есть и существенные ограничения, влияющие на расширение экологических проектов до уровня массовости. Среди которых, целый ряд обладающих ключевыми особенностями положений: появление новых игроков на рынке разработки и производства компонентов, что приводит к рискам недостаточного качества и надежности элементного состава автомобилей; ограничения в добыче и высокая стоимость редкоземельных материалов используемых при производстве тяговых электродвигателей; неразвитая инфраструктура обеспечения эксплуатационной эффективности ЭМБ и АКЭУ.

Перечень вскрытых в ходе работы достоинств и недостатков электротехнических проектов транспортных средств, по сути, представляют собой матрицу менеджмента, из рассмотрения которой необходимо обозначить прогноз развития соответствующих транспортных технологий. Однако сложность решения данной задачи заключается в примерной равноценности выделенных плюсов и минусов.

Сейчас можно говорить лишь о глобальном развитии направления экомобилей. Лидера в научных разработках и технологиях транспорта на топливных элементах, биотопливе или с использованием электрических технологий пока нет. Но что бесспорно – развитие электротехники и электроники в современных условиях является фундаментальной основой развития транспортного сектора. В условиях недостаточного обеспечения качества и надежности традиционных систем электрооборудования автомобилей, соответствующие проблемы будут сопутствовать и новым электротехническим комплексам [159].

Экспертные оценки по объемам рынка ЭМБ и АКЭУ (IHS Automotive) примерно составляют 700000 единиц к 2016 г. В ближайшее время, впечатляющий рост будет демонстрировать китайский рынок новых транспортных технологий. Это связано с наличием ресурсной и производственной баз, а также с перспективами развития научно-технического сектора. Государственная Электросетевая Корпорация Китая совместно с энергетическими гигантами объявили о планах

разработки и реализации проекта строительства сети зарядных станций. Проект настолько амбициозный, что подразумевает наличие не менее 10000 станций уже к 2020 г. [209].

По прежнему, мы можем говорить лишь об использовании электромобилей в качестве городского транспорта, поэтому улучшение качества жизни населения в развитых странах, а также понимание важности решения экологических проблем, скорее всего, приведет к тому, что экомобиль станет вторым автомобилем в семьях. Примерно такая же картина ожидается и коммерческие транспорт. Легкий и среднетонажный коммерческий транспорт, работающий в городских условиях в перспективе может быть переведен на электрические технологии.

Одним из возможных решений проблемы расширения парка таких транспортных средств является развитие сервисных технологий передачи транспортных средств на прокат, или развитие сети такси.

Сегодня государственные структуры в ряде стран, с целью обеспечения собственной независимости на энергетическом рынке активно поддерживают инновационные начинания в области ЭМБ и АКЭУ. Однако практика показывает, что такая поддержка ограничивается 10 – 15 летним периодом, после которого ответственность за реализацию проектов переходит в бизнес-среду. Вопрос о возможностях бизнеса в части полной самостоятельности решения проблем проектирования, производства и эксплуатации таких сложных систем, какими являются ЭМБ и АКЭУ остается открытым.

1.12 Выводы по главе

Рассматривая перспективы автомобильной промышленности, необходимо выделить несколько факторов оказывающих наиболее существенное влияние на ее развитие:

- 1- ужесточение конкуренции между автопроизводителями;
- 2- развитие экологических требований к содержанию вредных выбросов;
- 3- ограничения на рынках энергоносителей;

4- качественный рост уровня техники и технологий в области электротехники и электроники;

5- разработка и реализация в развитых странах программ государственного регулирования развития транспорта;

6- необходимость обеспечения высокого уровня качества и надежности как традиционных, так и перспективных транспортных комплексов.

Исходя из вышеизложенного, логичным направлением роста проектов автомобилей, являются экомобили на основе электрических технологий. ЭМБ и АКЭУ, уже сегодня представляют собой довольно широкий спектр транспортных средств, способных решать как личные задачи автолюбителей, так и коммерческие задачи бизнеса.

Наиболее интенсивное развитие электрических технологий на транспорте наблюдается в Западных странах. В России, за исключением отдельных проектов (Эллада – ОАО «АВТОВАЗ» и Ё-мобиль), развитие соответствующих технологий существенно отстает.

Важнейшей компонентной областью конструкций ЭМБ и АКЭУ являются тяговые аккумуляторные батареи, тяговые электродвигатели и электронные системы поддержания эффективности движения транспортного средства.

В настоящее время, активно разрабатываются новые технические решения, обеспечивающие повышение эффективности транспортных средств на основе электрических технологий: применение новых материалов в конструкциях ТАБ и электроприводах; разработка и реализация сервисных проектов по обслуживанию транспортных средств; развитие интеллектуальных технологий мониторинга, обеспечения и оптимизации движения транспортных потоков.

Несмотря на неоднозначность прогнозов повышения роли ЭМБ и АКЭУ в транспортном секторе будущего, уже сейчас сформированы мировые ресурсные, научные и производственные центры, реализующие перспективные задачи. В число таких центров Россия пока не попадает, из-за отсутствия конкурентных технико-технологических решений в областях ресурсного, проектного, производственного и сервисного обеспечения инновационных проектов экологического

транспорта.

По самым скромным прогнозам, сегмент мирового рынка транспортных средств на электрических технологиях определяется в 700000 единиц, уже к 2016 г.

Таким образом, можно сделать вывод о наличии проблемных областей практически во всех процессах жизненного цикла ЭМБ и АКЭУ, начиная от процесса проектирования, заканчивая обеспечением эксплуатационной эффективности и утилизацией. Практика показывает, что решение проблем на системном уровне, должно основываться на обеспечении качества и надежности соответствующих транспортных комплексов и сопутствующих процессов сервиса и обеспечения.

Соответственно, требуется разработка и реализация комплекса научно-практических инструментов обеспечения качества и надежности компонентной и инфраструктурной областей проектирования, производства и эксплуатации ЭМБ и АКЭУ, с учетом текущих и перспективных требований.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И АВТОМОБИЛЕЙ С КЭУ

2.1 Общие уравнения циклического движения автомобиля

Процессы преобразования энергии в системе тягового привода ЭМБ или АКЭУ характеризуются реверсивностью. Прямое преобразование энергии, когда электроэнергия превращается в механическую, используется в фазах разгона и установившегося движения. Здесь происходит преодоление сил сопротивления движению и реализации ЭМБ или АКЭУ заданного ускорения. В обратном процессе энергопреобразования, когда механическая энергия превращается в электрическую, реализуется фаза рекуперативного торможения для обеспечения повышения динамических качеств и энергетических показателей ЭМБ и АКЭУ [38, 165].

Классификация режимов движения ЭМБ и АКЭУ по основным фазам позволяет определять транспортные циклы необходимые для аналитических исследований и натурных испытаний тяговых систем. Также это позволяет систематизировать и решать общие уравнения (тягового, мощностного и энергетического балансов) движения ЭМБ или АКЭУ.

Уравнение тягового баланса имеет вид

$$F_k \equiv F_{\Sigma} = F_f + F_{\alpha} + F_w + F_j, \quad (2.1)$$

где F_k – сила тяги автомобиля, необходимая преодоления для равнодействующей силы сопротивления F_{Σ} ;

$F_f = mgf \cos \alpha$ – сила сопротивления качения, Н;

m – масса АТС, кг;

g – ускорение свободного падения (9,81 м/с²);

f – коэффициент трения качения;

α – угол уклона дороги, при малых углах $\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha$;

$F_{\alpha} = \pm mg \sin \alpha$ – сила сопротивления уклона дороги;

$F_w = 0,5c_x\rho Sv^2$ – сила аэродинамического сопротивления,

c_x – коэффициент аэродинамического сопротивления;

ρ – плотность воздуха;

v – скорость движения АТС, м/с;

S – площадь миделя АТС, м²;

$F_j = \delta m \frac{dv}{dt}$ – сила инерции;

δ – коэффициент учета вращающихся масс;

$\frac{dv}{dt}$ – ускорение, м/с².

После введения переменных

$\psi = f \cos \alpha \pm \sin \alpha$ – суммарный коэффициент сопротивления дороги;

$K_w = 0,5c_x\rho S/(mg)$; $K_j = \delta/g$; $G = mg$, уравнение тягового баланса (2.1)

примет вид

$$F_k = G \left(\psi + K_w v^2 + K_j \frac{dv}{dt} \right) \quad (2.2)$$

Предельное значение тяги автомобиля $F_{k\max}$ определяется силой сцепления ведущих колес с дорогой $F_{сц}$

$$\left. \begin{aligned} F_{k\max} &\leq F_{сц}; \\ F_{сц} &= K_c mg \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где φ и $K_c = 0,5$ – коэффициенты сцепления колес с дорогой - φ (для сухого асфальта $\varphi = 0,6...0,7$), и сцепного веса - K_c .

Момент M_k , приведенный к валу ведущего колеса определяются через силу тяги F_k

$$\left. \begin{aligned} M_k &= F_k r_k; \\ \omega_k &= \frac{v}{r_k}. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

ω_k - частота вращения ведущего колеса, v - скорость движения АТС

Выражение тяговой мощности P_k , подводимой к ведущим колесам записывается в виде

$$P_k = F_k v = G \left(\psi + K_w v^2 + K_j \frac{dv}{dt} \right) v. \quad (2.5)$$

Максимальная тяговая мощность $P_{k\max}$ при движений АТС с максимальной

скоростью $v_{\text{макс}}$ по горизонтальной дороге ($\alpha = 0$)

$$P_{k\text{макс}} = G(f + K_w v^2)v_{\text{макс}} \cdot \quad (2.6)$$

Мощностной баланс на валу тягового электродвигателя

$$P_M = P_k / \eta_{\text{ТР}}, \quad (2.7)$$

где P_M – необходимая механическая мощность на валу электродвигателя для преодоления сил сопротивления движению.

Полезная мощность $P_{\text{зэу}}$ гибридной энергоустановки (ГЭУ) для реализации тяговых свойств АТС

$$P_{\text{ГЭУ}} = P_k / \eta_{\Sigma}, \quad (2.8)$$

где $\eta_{\Sigma} = \eta_{\text{ГЭУ}}\eta_{\text{БВП}}\eta_{\text{ТЭД}}\eta_{\text{ТР}}$;

$\eta_{\text{ГЭУ}}, \eta_{\text{БВП}}, \eta_{\text{ТЭД}}$ - КПД гибридной энергоустановки (ГЭУ), КПД бортового вентильного преобразователя (БВП) и КПД ТЭД.

Интегралом (2.9) определяется пройденный путь АТС L за интервал времени движения t

$$L = \int_0^t v dt, \quad (2.9)$$

а интегралом (2.10) баланс энергии W_k при движении АТС при известных силе тяги F_k или мощности P_k

$$W_k = \int_0^L F_k dl = \int_0^t P_k dt \quad (2.10)$$

Расход энергии на за 1 км пройденного пути $w_{\text{пр}}$

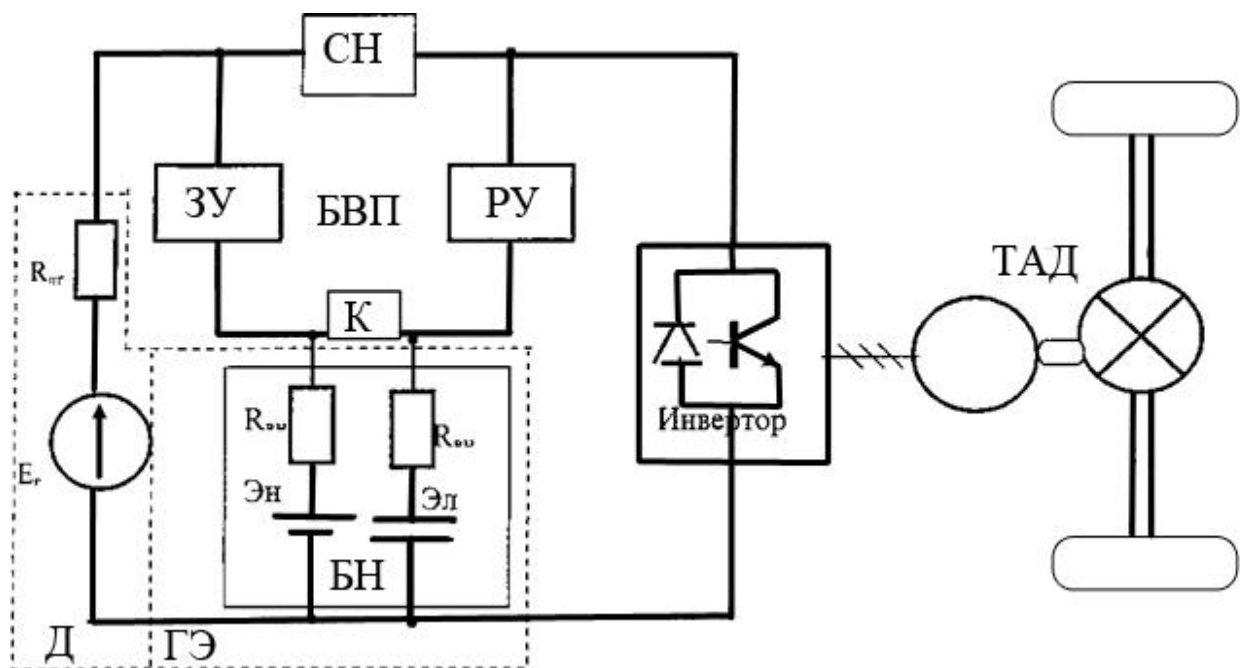
$$w_{\text{пр}} = W_k / L \quad (2.11)$$

Уравнения движения, баланса сил, мощности и энергии для городского цикла движения автомобиля обобщены в таблице 2.1 [164, 165].

Энергетические характеристики АТС. Тяговые системы на электроприводах, как правило, имеют меньшие потери, чем соответствующие системы с тепловыми двигателями, так как за счет более высокого уровня организации процессов энергопреобразования получают значительно лучшую степень использования энергии, что имеет ключевое значение для оценки перспектив развития электрических тяговых систем. В условиях различных режимов эксплуатации ЭМБ и АКЭУ, наиболее актуальны исследования затрат энергии для режимов разгона и

динамического торможения.

На рисунке 2.1 приведена укрупненная функциональная схема тяговой системы с ГЭУ по последовательной схеме, принятой в исследовании за базовую.



ЗУ – зарядное устройство; РУ – разрядное устройство; СН – стабилизатор напряжения; БВП – бортовой вентиляльный преобразователь; К – ключевой коммутатор; БНЭ – бортовые накопители энергии; ЭНН – энергоемкий накопитель; ЭлН – электросиловой накопитель; Д – ГУ – «двигатель - генераторная установка»; ГЭУ – гибридная энергоустановка; ТАД – тяговый асинхронный электродвигатель

Рисунок 2.1 – Укрупненная функциональная схема тяговой системы ЭМБ или АКЭУ

В основу анализа и расчета энергозатрат при циклическом движении ЭМБ и АКЭУ положен метод энергетического баланса [32, 33, 44, 66]. Тяговая система АКЭУ состоит из энергетических модулей, осуществляющих параллельно-последовательное преобразование и передачу энергии в: гибридной энергоустановке (ГЭУ), состоящей из БНЭ – бортовых накопителей энергии, включая: ЭНН – энергоемкий накопитель; ЭлН – электросиловой накопитель и бортового источника энергии в составе Д – ГУ - «двигателя – генераторной установки»; бортовых вентиляльных преобразователях (БВП); тяговом электродвигателе (ТЭД); трансмиссии (ТР).

Зарядное устройство (ЗУ) обеспечивает заряд БНЭ от Д-ГУ (при избыточной мощности, генерируемой ГУ; при выбеге, торможении, стоянке) и от рекупе-

рации при торможении. При недостаточной энергии со стороны Д-ГУ ТАБ разряжается через разрядное устройство (РУ). Стабилизатор напряжения (СН) дает возможность согласовать работу Д-ГУ с БНЭ при различных режимах движения самого АКЭУ, обеспечивая более эффективное использование источника и накопителей энергии.

Энергетическая диаграмма тяговой системы гибридного автомобиля для ездового цикла в общем виде показана на рисунке 2.2.

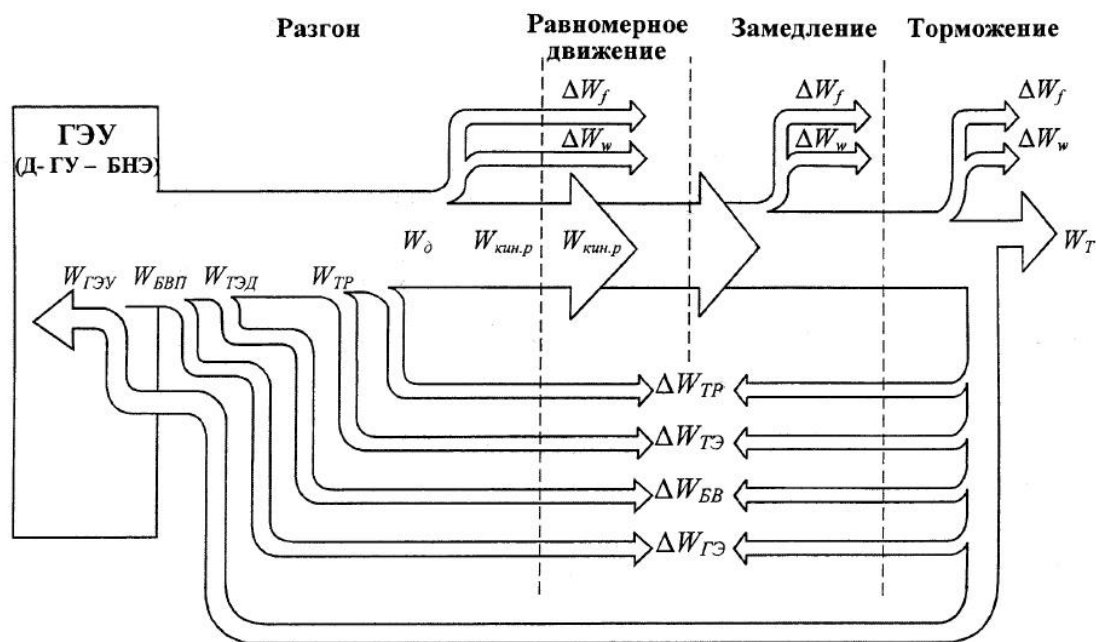


Рисунок 2.2 – Баланс энергии при циклическом движении ЭМБ или АКЭУ

Энергия $W_{ГЭУ}$, необходимая для обеспечения движения АТС

$$W_{ГЭУ} = W_{Д-ГУ} + W_{БНЭ}, \quad (2.12)$$

Энергия $W_{ДГ}$, выработанная Д - ГУ, за цикл движения $t_{ц}$ АТС равна

$$W_{ДГ} = \int_0^{t_{ц}} U_{ДГ} I_{ДГ} dt. \quad (2.13)$$

При работе Д - ГУ в оптимальном режиме имеем

$$I_{ДГ} = I_{ДГ}^{opt}; U_{ДГ} = U_{ДГ}^{opt}. \quad (2.14)$$

Энергию $W_{РАБ}$, отдаваемую ТАБ при разряде получаем интегрированием

$$W_{РАБ} = U_{срАп} \int_0^{t_p} i_p dt, \quad (2.15)$$

где $U_{РАБ}$ – среднее напряжение ТАБ при разряде;

i_p, t_p - ток и время разряда.

По аналогии рассчитаем энергию заряда W_{3AB} ТАБ за время заряда t_3 при среднем напряжении U_3

$$W_{3AB} = U_3 \int_0^{t_3} i_3 dt, \quad (2.16)$$

суммарный расход энергии за цикл $W_{ГЭУ}^Ц$ ГЭУ определяется по формуле

$$W_{ГЭУ}^Ц = (\Delta W_C + \Delta W_{TP} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{\delta c} + \Delta W_{ГЭУ})_P + W_{кин.P} + (\Delta W_C + \Delta W_{TP} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{\delta c} + \Delta W_{ГЭУ})_{УД} - W_{рек} \quad (2.17)$$

где $\Delta W_C = \Delta W_f + \Delta W_w$ – потери энергии, затрачиваемые на преодоление сил трения качения (ΔW_f) и аэродинамического сопротивления (ΔW_w);

$\Delta W_{\delta c}$ – расход энергии в бортовой сети АТС;

$\Delta W_{БВП}, \Delta W_{ТЭД}, \Delta W_{TP}$ – потери энергии в модулях системе тягового привода (ГЭУ, БВП, ТЭД, TP);

$W_{кин.P}$ – кинетическая энергия, накопленная в фазе разгона;

$W_{рек}$ – энергия рекуперации при замедлении.

В уравнении (2.17) индексы фаз цикла «P» и «УД» относятся к каждому слагаемому, находящемуся внутри соответствующих скобок.

Для фазы замедления, возможен режим, когда батарея не обменивается энергией с электрической машиной, т.е. $\Delta W_{ГЭУ} = 0$ и $W_{рек} = 0$. В этом случае работа по преодолению сил сопротивления движению совершается за счет изменения $\Delta W_{кин.3}$ запаса кинетической энергии $\Delta W_{кин.P}$. Тогда

$$\Delta W_{кин.3} = (\Delta W_C + \Delta W_{TP})_3 \quad (2.18)$$

Уравнение (2.19) соответствует балансу энергии для фазы торможения

$$\Delta W_{кин.T} = (\Delta W_C + \Delta W_{TP})_3 + W_{рек} + W_{мех.T} + (\Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{\delta c} + \Delta W_{ГЭУ})_{рек} + (\Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{\delta c} + \Delta W_{ГЭУ})_{рек} \quad (2.19)$$

где $W_{кин.T}$ – кинетическая энергия, выделяющаяся в механической тормозной системе;

$W_{мех.T}$ – изменение кинетической энергии автомобиля при торможении

$$\Delta W_{кин.T} = W_{кин.P} - W_{кин.3} \quad (2.20)$$

В режиме рекуперативного торможения без использования механической

тормозной системы уравнение баланса энергии имеет вид:

$$\Delta W_{кин.Т} = (\Delta W_C + \Delta W_{TP})_T + W_{рек} + (\Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{ГЭУ})_{рек} \quad (2.21)$$

Выражение для энергии рекуперации $W_{рек}$

$$W_{рек} = W_{кин.Р} - (\Delta W_C + \Delta W_{TP})_З - (\Delta W_C + \Delta W_{TP})_T - (\Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{ГЭУ})_{рек} \quad (2.22)$$

Полученные уравнения дают возможность рассчитать энергетику цикла ГЭУ с полной рекуперацией

$$W_{ГЭУ}^{Ц} = (\Delta W_C + \Delta W_{TP} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{\delta c} + \Delta W_{ГЭУ})_P + W_{кин.Р} + (\Delta W_C + \Delta W_{TP} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{\delta c} + \Delta W_{ГЭУ})_{УД} \quad (2.23)$$

Расход энергии $W_{ГЭУ}^{Ц}$ ГЭУ за цикл без рекуперации равняется

$$W_{ГЭУ}^{Ц} = (\Delta W_C + \Delta W_{TP} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{\delta c} + \Delta W_{ГЭУ})_P + (\Delta W_C + \Delta W_{TP} + \Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{\delta c} + \Delta W_{ГЭУ})_{УД} + (\Delta W_C + \Delta W_{TP})_З + (\Delta W_C + \Delta W_{TP})_T + (\Delta W_{ТЭД} + \Delta W_{БВП} + \Delta W_{ГЭУ})_{рек} \quad (2.24)$$

При известных параметрах модулей ЭМБ или АКЭУ приведенные уравнения дают возможность расчета $W_{ГЭУ}^{Ц}$. В оценочных расчетах, когда параметры модулей не известны, $W_{ГЭУ}^{Ц}$ определяется равенством

$$W_{ГЭУ}^{Ц} = \frac{\Delta W_{C.P} + W_{кин.Р} + \Delta W_{C.УД}}{\eta_{p\Sigma}} - W_{рек};$$

$$W_{рек} = (W_{кин.Р} - \Delta W_{C.P} - \Delta W_{C.T})\eta_{з\Sigma}, \quad (2.25)$$

где $\eta_{p\Sigma} = \eta_{TP}\eta_{ТЭД}\eta_{БВП}\eta_{pГЭУ}$; $\eta_{з\Sigma} = \eta_{TP}\eta_{ТЭД}\eta_{БВП}\eta_{зГЭУ}$, η_{TP} , $\eta_{ТЭД}$, $\eta_{БВП}$, $\eta_{pГЭУ}$, $\eta_{зГЭУ}$ — КПД трансмиссии, тягового электродвигателя, преобразователя, ГЭУ, соответственно.

С учетом (2.25)

$$W_{ГЭУ}^{Ц} = \frac{\Delta W_{C.P} + \Delta W_{C.УД}}{\eta_{p\Sigma}} + (\Delta W_{C.З} + \Delta W_{C.T})\eta_{з\Sigma} + W_{кин.Р} \left(\frac{1}{\eta_{p\Sigma}} - \eta_{з\Sigma} \right). \quad (2.26)$$

Для случая торможения без рекуперации

$$W_{ГЭУ}^{Ц} = \frac{1}{\eta_{\Sigma}} (\Delta W_{C.P} + \Delta W_{C.УД} + W_{кин.Р}). \quad (2.27)$$

Удельный расход энергии за цикл определяется отношением

$$w_{ГЭУ}^ц = \frac{w_{ГЭУ}^ц}{mL_{ц}}, \quad (2.28)$$

где $L_{ц}$ – пробег за цикл движения, км;

m - масса АТС, кг.

Результаты расчетов, проведенных на основе уравнений, показали, что оптимальная работа ГЭУ позволяет обеспечить автономность ЭМБ или АКЭУ полной массой 8000 кг с Д – ГУ мощностью около 30 кВт в течение 12 часов интенсивной эксплуатации при средней скорости движения 45...50 км/ч. При этом реализация в комплексе с ТАБ тяговой конденсаторной батареи (ТКБ), как электросилового накопителя, обеспечивает демпфирование динамических нагрузок при разгоне ЭМБ или АКЭУ и при движении на подъем. Эффективная разработка параметров и режимов ГЭУ позволяет ТАБ и ТКБ постоянно находиться в подзаряженном состоянии. Таким образом, БНЭ обеспечивает бесперебойную эксплуатацию ЭМБ или АКЭУ. Исследование и анализ процессов энергопреобразования в автомобилях на электрических технологиях позволяет более эффективно подойти к проблеме массогабаритных показателей ГЭУ и таким образом улучшить технико-эксплуатационные характеристики АТС в целом.

Статические режимы АТС. Под статическими режимами понимается прямолинейное равномерное движение ЭМБ или АКЭУ по горизонтальной дороге ($i=0$), с заданной величиной углов уклона дороги ($i > 0$ при подъеме; $i < 0$ при спуске). Расчет статических режимов движения определяет величины тяговых сил F_k , моментов M_k , мощностей P_k для различных постоянных скоростей и углов подъема, спуска. Это, в первую очередь, определяет требуемые максимальные величины силы тяги момента $M_{k_{макс}}$ и мощности $P_{k_{макс}}$ для заданной максимальной скорости $v_{макс}$ и, во вторую, поведение составляющих сил и моментов сопротивления движения.

Расчет параметров статических режимов ЭМБ и АКЭУ является основой для определения характеристик трансмиссии: передаточного числа u_m ; максимальных момента $M_{макс}$, мощности $P_{макс}$ и угловой частоты вращения ТЭД $\omega_{макс}$;

мощности, тока и напряжения БВП и ГЭУ.

Согласно проведенного анализа параметров и характеристик ЭМБ и АКЭУ эксплуатируемых в городских условиях были разработаны технические требования для ЭМБ и АКЭУ, которые представлены в таблице 2.2.

Динамические характеристики АТС. Под динамическими режимами рассматривается движение ЭМБ или АКЭУ при разгоне и торможении. При движении в городских условиях ЭМБ или АКЭУ должен обеспечивать динамические параметры не хуже, чем у традиционных АТС.

Расчет максимальных величин сил тяги, момента, и мощности динамических режимов ЭМБ или АКЭУ необходим для определения предельных характеристик энергоустановки.

Для городских циклов движения ускорение $a(t)$ автомобиля до заданной скорости v_3 за время T_p может быть равноускоренным (рисунок 2.3 а); равноускоренным на первом этапе (от 0 до T_n – время перехода от первого этапа на второй) и экспоненциальным на втором (от T_n до T_p (рисунок 2.3 б); разгона с постоянным ускорением на первом этапе и переменным ускорением на втором, в конце которого ускорение не равно нулю (рисунок 2.3 в).

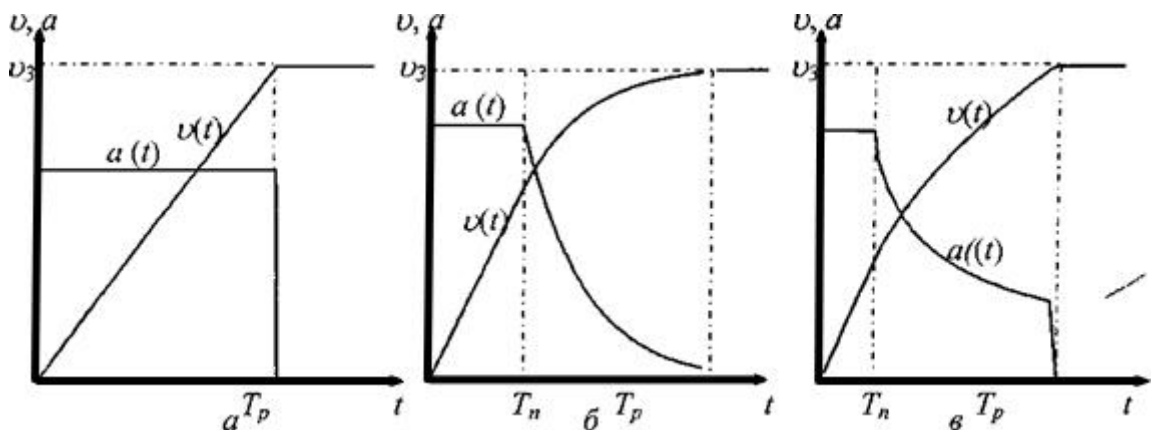


Рисунок 2.3 – Диаграммы ускорения $a(t)$ и скорости $v(t)$ для городских циклах разгона

Равноускоренный разгон (рисунок 2.3 а) описывается уравнением движения

$$\frac{dv}{dt} = a = const \quad (2.29)$$

при этом параметры фазы для заданного времени разгона (T_p) равны

$$v = aT_p; L = \int_0^{T_p} v dt = \frac{1}{2} aT_p^2, \quad (2.30)$$

а решение общих уравнений движения (тягового, мощностного и энергетического балансов) принимает вид (2.31 – 2.33)

$$F_k = G(\psi + K_w v^2 + K_j a); \quad (2.31)$$

$$P_k = F_k v = G(\psi + K_w v^2 + K_j a) a T_p; \quad (2.32)$$

$$W_k = \int_0^{T_p} P_k dt = W_\psi + W_w + W_j = \frac{1}{2} G a T_p^2 \left(\psi + \frac{1}{2} K_w a^2 T_p^2 + K_j a \right). \quad (2.33)$$

Уравнения движения при разгоне по экспоненциальному закону имеют вид

$$\left. \begin{aligned} a &= a_0 e^{-\frac{t}{\tau}}; \\ v &= a_0 \tau \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

где τ – постоянная экспоненты,

$v(T_p) = 0,9502 v_{уст}$ при $\tau = T_p/3$; $v(T_p) = 0,9817 v_{уст}$ при $\tau = T_p/4$; $v(T_p) = 0,9933 v_{уст}$ при $\tau = T_p/5$.

Принимаем, что $\tau = T_p/4$, при этом относительная погрешность достижения ЭМБ или АКЭУ установившейся скорости составляет 1,83%. Тогда имеем

$$a_0 \tau = v_y; \quad a_0 = \frac{4v_y}{T_p}. \quad (2.35)$$

В фазе разгона за основу функции $v(t)$, можно выбрать закон движения лифта (рисунок 2.4 а), создающий максимальный комфорт для пассажиров и моделирующий движение ЭМБ или АКЭУ наиболее приближенно реальным условиям.

В общем виде зависимость $v(t)$ задается системой уравнений

$$v = \begin{cases} v_1 = a_0 t, \text{ при } 0 \leq t \leq T_n; \\ v_2 = v_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t-T_n}{\tau}} \right) + v_n e^{-\frac{t-T_n}{\tau}}, \text{ при } T_n \leq t \leq T_p; \end{cases} \quad (2.36)$$

$$a = \begin{cases} a_0, \text{ при } 0 \leq t \leq T_n; \\ \frac{v_{уст} - v_n}{\tau} e^{-\frac{t-T_n}{\tau}}, \text{ при } T_n \leq t \leq T_p, \end{cases} \quad (2.37)$$

где T_n – период изменения функции от $v_1(t)$ к $v_2(t)$, с;

τ – экспоненциальная постоянная;

v_n – линейная скорость, м/с;

$v_{уст}$ – установившееся значение скорости, м/с;

a_0 – начальное ускорение м/с²;

a_0 и v_n определяются из условий, накладываемых на функцию $v(t)$:

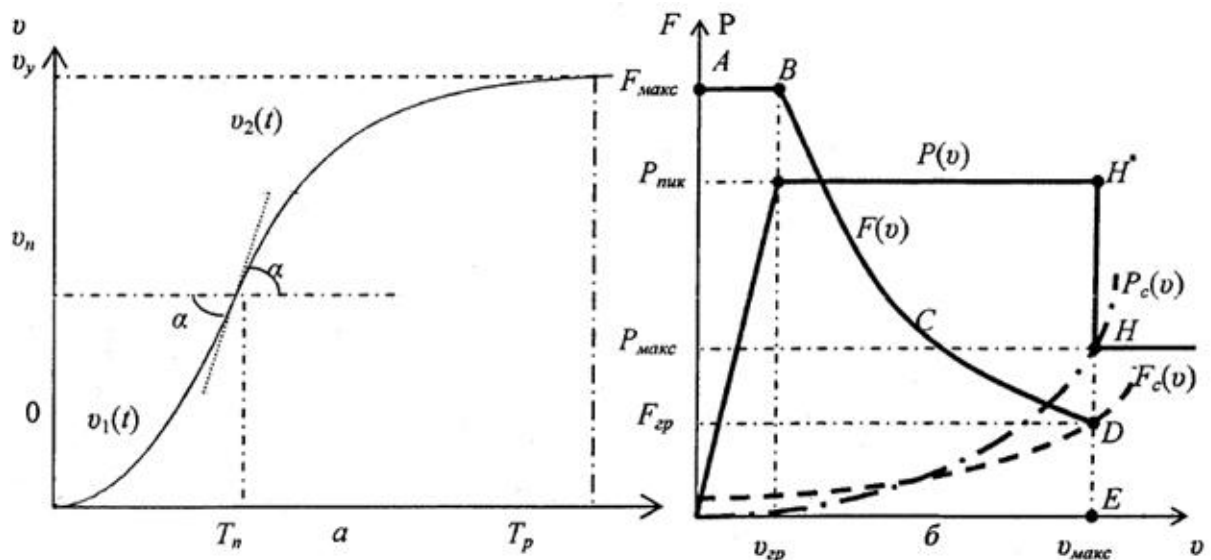
- кривая разгона должна быть непрерывной функцией на всем участке времени $0 \leq t < T_p$, следовательно, при $t = T_n$ $v = v_1(T_n) = v_2(T_n)$;

- для исключения рывков ЭМБ или АКЭУ при разгоне должно выполняться условие: $\frac{dv_1}{dt} = \frac{dv_2}{dt}$.

После преобразования, получаем

$$v_n = a_0 T_n; \quad (2.38)$$

$$\tau = \frac{T_n - T_p}{4}; a_0 = \frac{4v_y}{T_p + 3T_n}. \quad (2.39)$$



а – по закону движения лифта; б – по закону сохранения постоянной мощности
Рисунок 2.4 – Траектории разгона транспортного средства

В интервале $0 \leq t < T_n$ тяговый, мощностной и энергетический балансы определяются также, как и в фазе равноускоренного разгона.

При $T_n < t < T_p$ получаем

$$v = v_{уст} - (v_{уст} - v_n) e^{-\frac{t-T_n}{\tau}}. \quad (2.40)$$

Введя переменные: $A_0 = \frac{v_{уст} - v_n}{\tau}$; $V = v - v_n$; $T = t - T_n$ получим уравнения

$$V = A_0 \tau \left(1 - e^{-\frac{t-T_n}{\tau}}\right); a = A_0 e^{-\frac{t-T_n}{\tau}}. \quad (2.41)$$

С учетом новых переменных V , A_0 и T решения общих уравнений движения в интервале времени $T_n \leq t < T_p$ определяются также, как и в фазе разгона с переменным ускорением.

Таким образом, задаваясь значениями $v_{\text{усм}}$, T_p , можно проводить исследования разгона ЭМБ или АКЭУ для определенных ранее типах разгона, а также, варьируя значения T_n , исследовать различные законы движения при разгоне. При варьировании T_n можно определить значение T_n , при котором тяговая мощность оказывается минимальной. Отметим, что равноускоренный разгон и разгон с переменным ускорением являются частными случаями разгона по закону движения лифта.

Кроме отмеченных траекторий разгона процесс движения ЭМБ или АКЭУ до установившейся скорости обычно проводится по диаграмме (рисунок 2.3 б), что соответствует закону разгона с постоянной мощностью.

Разгон с переменным ускорением первого вида (рисунок 2.3 б). На рисунке 2.3 б даны графики скорости $v(t)$, ускорения $a(t)$, силы $F(t)$ и мощности $P(t)$ в функции времени.

В общем виде зависимость $v(t)$ задается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} a &= \begin{cases} a_0 & \text{при } 0 \leq t \leq T_n; \\ \frac{v_3 - v_n}{\tau} e^{-\frac{t-T_n}{\tau}} & \text{при } T_n \leq t \leq T_p; \end{cases} \\ v &= \begin{cases} v_1 = a_0 t & \text{при } 0 \leq t \leq T_n; \\ v_2 = v_3 \left(1 - e^{-\frac{t-T_n}{\tau}}\right) + v_n e^{-\frac{t-T_n}{\tau}} & \text{при } T_n \leq t \leq T_p, \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

где T_n – момент скачка скорости $v_1(t)$ к скорости $v_2(t)$;

v_n – скорость в момент перехода от $v_1(t)$ к $v_2(t)$;

a_0 – первоначальное ускорение;

τ – экспоненциальная постоянная.

Значения a_0 и v_n рассчитываются из условия непрерывности функции при

$0 < t < T_n$, следовательно, при $t = T_n$ $v = v_1(T_n) = v_2(T_n)$;

- во время разгона должны отсутствовать рывки, что означает равенство

$\frac{dv_1}{dt} = \frac{dv_2}{dt}$ в точке изменения функций от $v_1(t)$ к $v_2(t)$.

Принимая $\tau = \frac{(T_n - T_p)}{4}$, $v(T_p) = 0,9817v_3$ после проведения математических преобразований, получаем

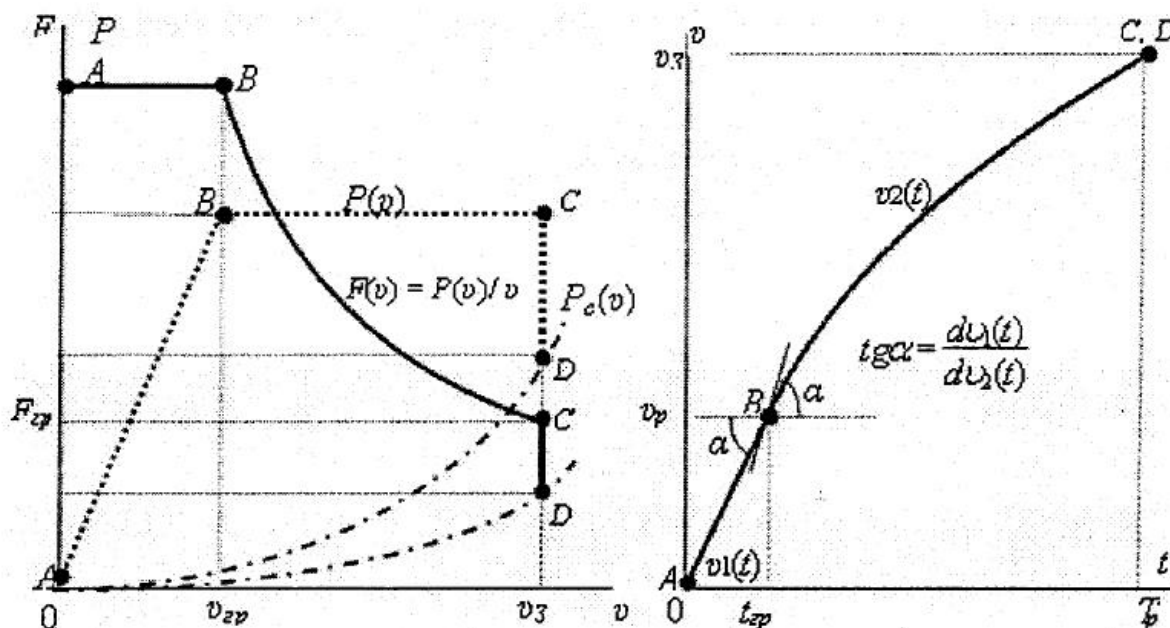
$$v_n = a_0 T_n; \quad a_0 = \frac{4v_y}{(T_p - 3T_n)}. \quad (2.43)$$

При $T_n \leq t \leq T_p$ с введением переменных $A_0 = \frac{(v_3 - v_n)}{\tau}$; $V = v - v_n$; $T = t - T_n$, уравнения движения преобразуются к виду

$$V = A_0 \tau \left(1 - e^{-\frac{t-T_n}{\tau}} \right); a = A_0 e^{-\frac{T}{\tau}}. \quad (2.44)$$

Задаваясь значениями v_3 , T_p проанализируем процессы разгона ЭМБ или АКЭУ для различных условий. Изменяя значения T_n определим значение T_n , при котором необходимая тяговая мощность $P_{кнук}$ в пиковом режиме и энергия W_k будут отвечать критерию минимальности.

Для графика разгона, показанного на рис. 2.3в поддержание момента, развиваемого ТЭД, постоянным до скорости $v_{гp}$ и постоянной мощности, тяговым двигателем до заданной скорости v_3 – необходимое и достаточное условие. Определяем этот алгоритм разгона как двухзонный. Тяговая характеристика $F(v)$ (рисунок 2.4 б) представлена двумя участками, с постоянной силой тяги $F_{кмакс}$ (линия АВ), и постоянной пиковой тяговой мощностью $P_{кнук}$.



а – тягово-скоростная характеристика; б – временно-скоростная характеристика

Рисунок 2.5 – График разгона ЭМБ или АКЭУ с переменным ускорением по закону «двухзонного регулирования»

Движения ЭМБ или АКЭУ на участке АВ (рисунок 2.5 б) описывается уравнением

$$G \left(\psi + K_w v_1^2 + K_j \frac{dv_1}{dt} \right) = F_{k\text{макс}}, \quad (2.44)$$

На участке ВС – уравнением

$$G \left(\psi + K_w v_2^2 + K_j \frac{dv_2}{dt} \right) v_2 = P_{k\text{пик}}. \quad (2.45)$$

Отметим, что:

функция $v(t)$ (рисунок 2.5 б) должна отвечать требованию непрерывности на интервале времени $0 \leq t \leq T_p$, значит, в момент $t = t_{гр}$, соответствующий точке В

$$v_B = v_1(t_{гр}) = v_2(t_{гр}); \quad (2.46)$$

движение ЭМБ или АКЭУ при наборе скорости не должно сопровождаться рывками, т.е.

$$\left. \frac{dv_1}{dt} \right|_{t=t_{гр}} = \left. \frac{dv_2}{dt} \right|_{t=t_{гр}} \quad (2.47)$$

Подставляя (2.46), (2.47) в (2.44) и (2.45), получаем

$$v_B = \frac{P_{k\text{пик}}}{F_{k\text{макс}}}. \quad (2.48)$$

Справедливы следующие уравнения

В точке А

$$v_A = 0; F_A = F_{k\text{макс}}; P_A = 0. \quad (2.49)$$

В точке В

$$\left. \begin{aligned} v_B = v_{гр} = \frac{v_3}{K_{vгр}}; \\ F_B = F_{k\text{макс}}; \\ P_B = F_{k\text{макс}} v_{гр} = P_{k\text{пик}} = K_p P_{kз} = K_p G(\psi + K_w v_3^2) v_3, \end{aligned} \right\} \quad (2.50)$$

где $K_{vгр}$ – кратность заданной скорости v_3 к граничной скорости $v_{гр}$ ($K_{vгр} \geq 1$, $K_{vгр} = 1$ при прямолинейном разгоне);

$P_{kз} = K_p G(\psi + K_w v_3^2) v_3$ – тяговая мощность на колесе ЭМБ или АКЭУ при равномерной скорости v_3 ;

K_p – коэффициент, учитывающий отношение пиковой мощности $P_{k\text{пик}}$ к установившейся мощности $P_{kз}$.

Максимум силы тяги $F_{k\text{макс}}$ на первом интервале АВ не может превышать силу сцепления колес с дорогой $F_{сц}$

$$1 \leq K_{v\text{гр}} \leq \frac{K_c \varphi}{K_p(\psi + K_w v_3^2)}; \quad (2.51)$$

В точке C

$$\left. \begin{aligned} v_C &= v_3; \\ F_C &= F_{\text{гр}}; \\ P_C &= F_C v_C = P_{\text{кпик}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.52)$$

В точке D

$$v_D = v_3; F_D = F_{\text{кмин}} = F_{\Sigma}; P_D = P_{\text{кз}}, \quad (2.52)$$

где F_{Σ} – суммарная сила сопротивления движению автомобиля на электрических технологиях, определяется по (2.1).

Находим $F_{\text{кмакс}}$

$$F_{\text{кмакс}} = K_p K_{v\text{гр}} G(\psi + K_w v_3^2). \quad (2.53)$$

Учитывая (2.53) движение ЭМБ или АКЭУ на участке AB описывается уравнением:

$$v = -\alpha(1 - e^{\alpha_0 t}) / (1 + e^{\alpha_0 t}), \quad (2.54)$$

или

$$t = (1/\alpha_0) \ln[(\alpha + v)/(\alpha - v)], \quad (2.55)$$

$$\text{где } \alpha = \sqrt{\frac{(F_{\text{кмакс}} - \psi)}{K_w}} = \sqrt{\frac{\psi(K_p K_{v\text{гр}} - 1)}{K_w} + K_p K_{v\text{гр}} v_3^2}; \quad \alpha_0 = \frac{2\alpha K_w}{K_j}.$$

Уравнение (2.55) позволяет определить момент времени t_{2p} , в котором скорость ЭМБ или АКЭУ достигает значения t_{2p} .

Введя дополнительный коэффициент K

$$K = K_p(\psi + K_w v_3^2) / (\psi + K_w x^2 v_3^2), \quad (2.56)$$

с учетом (2.56) преобразуем уравнение к виду

$$\left(\psi + K_w v^2 + K_j \frac{dv}{dt}\right) v = (\psi + K_w K^2 v_3^2) K v_3. \quad (2.57)$$

После преобразований уравнение (2.57) приводится в форме Коши

$$\int_{t_{\text{гр}}}^t dt = \frac{K_j}{K_w} \int_{v_{\text{гр}}}^v \left[\frac{R(v+\beta)}{(v+\beta)^2 + \gamma^2} + \frac{S+R\beta}{(v+\beta)^2 + \gamma^2} + \frac{T}{\lambda-v} \right] dv, \quad (2.58)$$

$$\text{где } \lambda = 2\beta = K v_3; \quad \gamma = \sqrt{\frac{\psi}{K_w} + \left(\frac{3}{4}\right) K^2 v_3^2};$$

$$R = T = \frac{2\beta}{9\beta^2 + \gamma^2} = \frac{K_w K v_3^2}{\psi + 3K_w K v_3^2};$$

$$S = 2R\lambda - 1 = -\frac{\psi + K_w K v_3^2}{\psi + 3K_w K v_3^2}.$$

Решение дифференциального уравнения (2.58) имеет вид

$$t = t_{гр} + \frac{K_w}{K_j} \left\{ R \ln \left[\frac{(\lambda - v_{гр}) \sqrt{(v + \beta)^2 + \gamma^2}}{(\lambda - v) \sqrt{(v_{гр} + \beta)^2 + \gamma^2}} \right] + \frac{S - R\beta}{\gamma} \left(\arctg \frac{v + \beta}{\gamma} - \arctg \frac{v_{гр} + \beta}{\gamma} \right) \right\}, \quad (2.59)$$

где $t_{гр}$ рассчитывается в соответствии с (2.55).

Дифференциальные уравнения (2.44) и (2.45) в соответствии с теоремой Коши имеют единственное решение в виде выражения (2.59), если определены конкретные начальные условия.

Выражение (2.59) определяет зависимость времени разгона t от коэффициентов $K\omega_{гр}$, K_p . Тяговую пиковую мощность $P_{клик}$, требуемую для разгона ЭМБ или АКЭУ до скорости ω_3 за время t_p можно рассчитать задавая величину $K\omega_{гр}$ с учетом ее условия ограничения (2.51). Уравнение (2.59) трансцендентное, и может быть решено одним из численных методов.

Рассчитать время разгона t_p до скорости ω_3 по выражениям (2.44 – 2.59) при заданных значениях $P_{клик}$, $F_{макс}$ не составляет труда.

Полученные аналитическими исследованиями совокупность взаимосвязей процесса разгона подтверждены результатами численных экспериментов, которые приведены в таблице 2.3.

Проведенные исследования в области определения расхода энергии на единицу пути – w , показывают, что при экспоненциальном законе разгона ЭМБ или АКЭУ на 2,7% тратится больше энергии, чем при равноускоренном. Движение по закону лифта на 11,6% менее энергозатратно по сравнению с равноускоренным. Предложенный – «двухзонный» закон разгона экономит 14,6% энергии относительно принятого при тестировании равноускоренного.

Разработанные основы математического анализа общих уравнений циклического движения ЭМБ и АКЭУ позволяют перейти к созданию методов аналитического конструирования автомобилей на электрических технологиях.

Таблица 2.1 – Обобщенные уравнения движения и баланса мощностей для фаз городского цикла движения

Фазы движения		Общие уравнения движения
Наименование	Уравнение движения	
Разгон	$a = \frac{dv}{dt}; v = \int_0^t a dt, \text{ где } a - \text{ ускорение};$ $L = \int_0^t v dt.$	$F_k = G(\psi + K_w v^2 + K_j \frac{dv}{dt}); P_k = F_k v = G(\psi + K_w v^2 + K_j \frac{dv}{dt})v;$ $W_k = \int_0^t P_k dt.$
Равномерное движение	$\frac{dv}{dt} = 0; v = const;$ $L = vt.$	$F_k = G(\psi + K_w v^2); P_k = F_k v = G(\psi + K_w v^2)v;$ $W_k = \int_0^t P_k dt = P_k t = G(\psi + K_w v^2)vt.$
Замедление	$\frac{dv}{dt} = -\frac{\psi + K_w v^2}{K_j}; v = v_{03} tg(\alpha_3 - \beta_3 t); v_{03} = \sqrt{\frac{\psi}{K_w}};$ $\alpha_3 = arctg\left(\frac{v_{H3}}{v_{03}}\right); \beta_3 = \sqrt{\frac{\psi K_w}{K_j}};$ $L = \int_0^t v dt = \frac{v_{03}}{\beta_{03}} \ln \left[\frac{Cos(\alpha_3 - \beta_3 t)}{Cos \alpha_3} \right].$	$F_k = -GK_j \frac{dv}{dt} = G(\psi + K_w v^2);$ $P_k = F_k v = G v_{03} [\psi + K_w v_{03}^2 tg^2(\alpha_3 - \beta_3 t)] tg(\alpha_3 - \beta_3 t);$ $W_k = \int_0^t P_k dt = \frac{1}{2} GK_w \tau v_{03}^3 \left[\left(\frac{v_{H3}}{v_{03}}\right)^2 - tg^2(\alpha_3 - \beta_3 t) \right].$
Торможение	$\frac{dv}{dt} = -\frac{\psi + K_w v^2 + F_t/G}{K_j}, \text{ где } F_t - \text{ тормозная сила};$ $v = v_{0T} tg(\alpha_T - \beta_T t); v_{0T} = \sqrt{\frac{\psi + F_t/G}{K_w}}; \alpha_T = arctg\left(\frac{v_{HT}}{v_{0T}}\right);$ $\beta_T = \sqrt{\frac{(\psi + F_t/G)K_w}{K_j}}; L = \int_0^t v dt = \frac{v_{0T}}{\beta_{0T}} \ln \left[\frac{Cos(\alpha_T - \beta_T t)}{Cos \alpha_T} \right].$	$F_k = -GK_j \frac{dv}{dt} = G(\psi + K_w v^2) + F_T;$ $P_k = F_k v = G v_{0T} [\psi + K_w v_{0T}^2 tg^2(\alpha_T - \beta_T t)] tg(\alpha_T - \beta_T t);$ $W_k = \int_0^t P_k dt = \frac{1}{2} G \tau v_{0T}^3 \left[\left(\frac{v_{HT}}{v_{0T}}\right)^2 - tg^2(\alpha_T - \beta_T t) \right].$

Таблица 2.2 – Требования к основным технико-эксплуатационным параметрам АТС

Параметр	Величина	
	Минимальная	Максимальная
1	2	3
Массогабаритные параметры		
Полная масса АТС, m_a , кг	6000	8000
Масса полезного груза, m_T , кг	2400	3600
Площадь миделя, S , м ²	1,2	1,6
Конструктивные характеристики		
Радиус качения колеса, r_k , м	0,21	0,25
Коэффициент аэродинамического сопротивления, C_x	0,19	0,23
Коэффициент учета вращающихся масс, δ	1,01	1,03
КПД силовых агрегатов тяговой системы		
Трансмиссии, η_{TP}		0,94
ТЭД, $\eta_{ТЭД}$		0,8
БВП, $\eta_{БВП}$		0,98
КЭУ при разряде, $\eta_{РЭУ}$		0,9
КЭУ при заряде, $\eta_{ЗЭУ}$		0,9
Дорожные условия		
Коэффициент трения качения, f	0,007	0,009
Уклон дороги, %	-25	25
Эксплуатационные свойства		

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3
Максимальная скорость, v_{\max} , км/ч	90	110
Минимальная скорость, v_{\min} , км/ч	3	5
Время t_p разгона АТС до скорости 50 км/ч до скорости 90 км/ч	6 15	8 21
Предельный подъем, преодолеваемый АТС при v_{\min} , %	22	25
Запас хода L АТС, км, при движении: со скоростью $v_{\text{ном}}$ в городском режиме	140 100	160 120

Таблица 2.3 – Сравнительная оценка по энергозатратам различных законов разгона автомобиля

Параметры и показатели	Параметры		Показатели			
	$a_{\text{макс}}$, м/с ⁻²	$M_{\text{макс}}$, Нм	$P_{\text{макс}}$, кВт	W , Втч	L , м	w , Втч / км
Траектория разгона						
Равноускоренный	1	1729	131,4	405,4	312,5	1297/ 100%
С переменным ускорением:						
- по экспоненте	1,98	2514	78,2	441,98	390	1333 /2,7%
- закону лифта	1,46	1907	69,8	434,5	373,8	1162/-11,6%
- с постоянными моментом и мощностью	1,51	2050	75	435,2	384,4	1132/-14,6%

2.2 Методика построения топограмм – многопараметровых характеристик двигателя внутреннего сгорания

Рассматривая вопросы повышения эффективности автомобилей на электрических технологиях, необходимо решить задачу, связанную с определением зависимости удельного расхода топлива, эффективности, мощности, момента от оборотов и разреженности во впускном коллекторе ГЭУ. Для решения поставленной задачи, рассмотрим методику получения многопараметровых характеристик из нагрузочных характеристик путем обработки экспериментальных данных и генерации матрицы с обобщенными экспериментальными данными. На основе матрицы экспериментальных данных разработаем аналитическую зависимость удельного расхода топлива, эффективности, мощности, момента от оборотов и разреженности во впускном коллекторе [145].

Мощность определяется по формуле

$$N_e = P_e \cdot iV_h \cdot n / (30\tau), \quad (2.60)$$

где P_e – разреженность во впускном коллекторе, МПа;

iV_h – объем двигателя, литр;

n – обороты вала двигателя, мин^{-1} ;

τ – тактность двигателя.

По известной величине мощности рассчитываем момент по формуле

$$M_e = N_e / \omega, \quad (2.61)$$

где $\omega = \pi \cdot n / 30$ - угловая частота вращения вала двигателя, с^{-1} .

Величина эффективности определяется по формуле

$$\eta_e = 1 / (H_u g_e) \quad (2.62)$$

где g_e – удельный расход топлива, кг/кВтс ;

H_{un} - удельная теплоемкость топлива.

Рассчитанные величины занесены в таблицу обобщенных характеристик ГЭУ (таблица 2.4). С использованием данных таблицы построим регуляторную и внешнюю скоростную характеристики.

Регуляторная характеристика (РХ) по таблице 2.4 находится: определение РХ по минимальному расходу топлива: при постоянной скорости выбирается минимальное значение удельного расхода топлива, момент соответствующий данному значению будет второй координатой вектора РХ. Определение ВСХ по максимальной мощности: координатами вектора ВСХ в данном случае являются последние значения оборотов и момента, при которых определено значение удельного расхода топлива из нагрузочных характеристик.

Регуляторная характеристика с минимальным удельным расходом топлива по нагрузочным характеристикам определяется следующим образом: на нагрузочной характеристике выбирается минимальное значение удельного расхода топлива и при этом значении определяется момент на валу двигателя по известным формулам. Координаты РХ и ВСХ сведены в таблицу 2.4.

Аппроксимируем РХ и ВСХ по контрольным точкам и делаем проверку по доверительному интервалу. Для экспериментальных точек указанных в таблице 2.4 находим аппроксимирующее уравнение, воспользовавшись методом наименьших квадратов. Для РХ по минимальному расходу топлива аппроксимирующее уравнение имеет вид

$$M_e = a + b \cdot n + c \cdot n^2 + d \cdot n^{2.5} + e \cdot n^3, \quad (2.63)$$

коэффициенты $a = 0.0399$, $b = 0.0505$, $c = -4.93 \cdot 10^{-5}$, $d = 9.51 \cdot 10^{-7}$, $e = -5.419 \cdot 10^{-9}$ рассчитаны по МНК.

ВСХ по максимальной мощности аппроксимируется уравнением

$$Me = a + b \cdot n + c \cdot n^2 + d \cdot n^3 + e \cdot \sqrt{n}, \quad (2.64)$$

где коэффициенты аппроксимации a , b , c , e .

Для сравнения аппроксимирующего уравнения его график представлен на рисунке 2.6 а. На этом же рисунке представлены контрольные экспериментальные точки PX_0 . Как видим из рисунка 2.6 а, эти точки с незначительными отклонениями лежат на линии тренда.

Следующим этапом идет решение аппроксимирующего уравнения для заданных частот вращения вала (таблица 2.5) и нахождение расчетных точек момента на валу двигателя. Погрешность аппроксимации определяем по формуле

$$\delta = \frac{Me_p(n_i) - Me_э(n_i)}{Me_э(n_i)} = \left[1 - \frac{Me_p(n_i)}{Me_э(n_i)} \right] \cdot 100, \quad (2.65)$$

где $Me_p(n_i)$ и $Me_э(n_i)$ – соответственно расчетный и экспериментальный моменты на валу двигателя при данных оборотах n_i .

Относительная погрешность не выходит за пределы доверительного интервала, в рассматриваемой задаче – 10-и процентного (рисунок 2.6 б), то есть выполняется достаточный признак адекватности. Результаты аппроксимации (рисунок 2.6 б) удовлетворяют всем признакам адекватности.

На рисунке 2.7 представлены графики аппроксимирующего уравнения и относительной погрешности для ВСХ по максимальной мощности на валу ДВС. Для аппроксимации был взят вектор ВСХ из обобщенных данных.

Для построения многопараметровых характеристик (топограмм) ГЭУ с использованием Matlab необходимо из данных составить квадратный двумерный массив. Координатами массива являются переведенные координатные базисы из значений скорости и момента на валу двигателя.

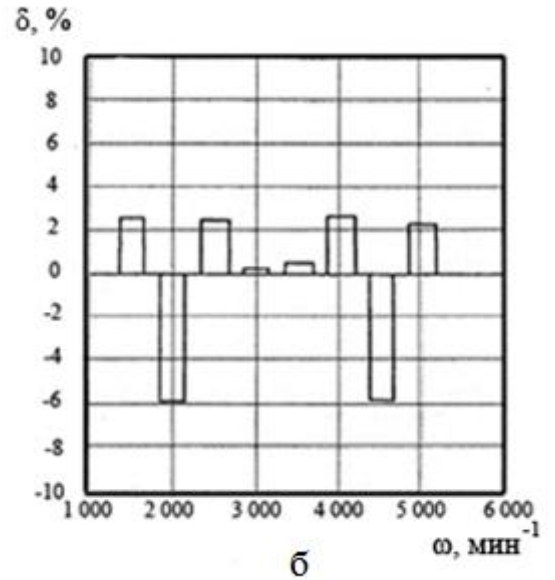
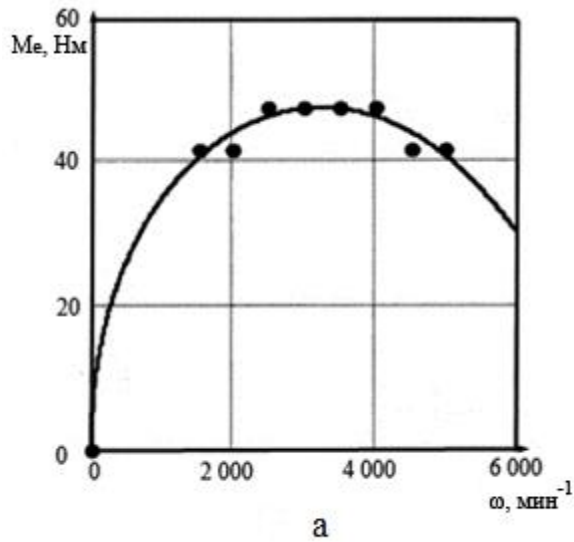


Рисунок 2.6 – Кривая аппроксимации РХ с контрольными точками эксперимента (а) и относительная погрешность аппроксимации в % (б)

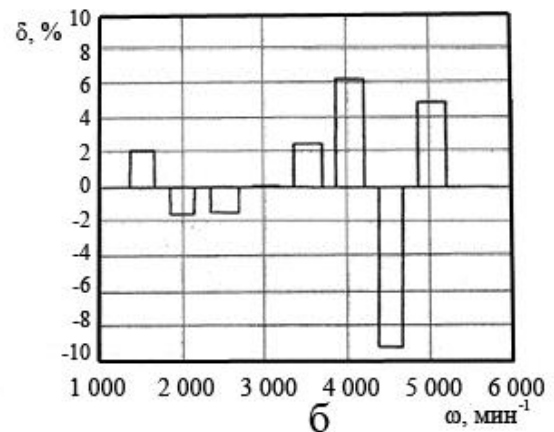
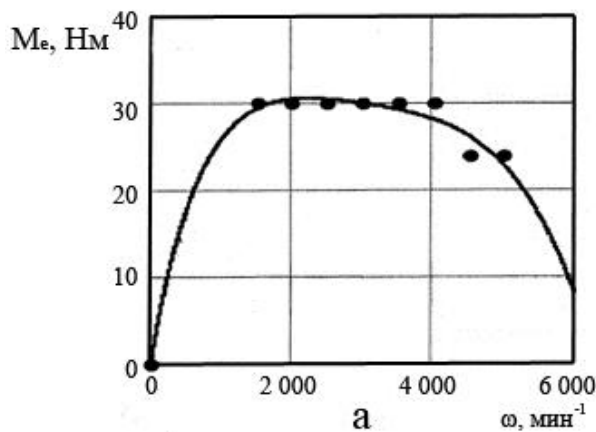


Рисунок 2.7 – Кривая аппроксимации ВСХ с контрольными точками эксперимента (а) и относительная погрешность аппроксимации в % (б)

При обработке данных и переводе значений оборотов и моментов в другой координатный базис необходимо, чтобы шаг по осям координат был одинаковый соответственно по оборотам и моменту. Чем больше элементов содержится в массиве, тем точнее будут графики, но увеличение их приводит к замедлению процесса расчета. Массив может быть составлен с помощью программы Excel или других программ обрабатывающих табличные данные. Соответствующий массив переводится в операционную среду Matlab.

Полученная таблица преобразуется в массив в среде Matlab и в дальнейшем интерполируется с помощью функции кубической сплайн-аппроксимации. В

дальнейшем по полученным данным строится график в трехмерных координатах 3D Plot, где можно выбрать представление в виде объемной плоскости или контурных линий характеризующих координаты имеющие одинаковый уровень (рисунок 2.8).

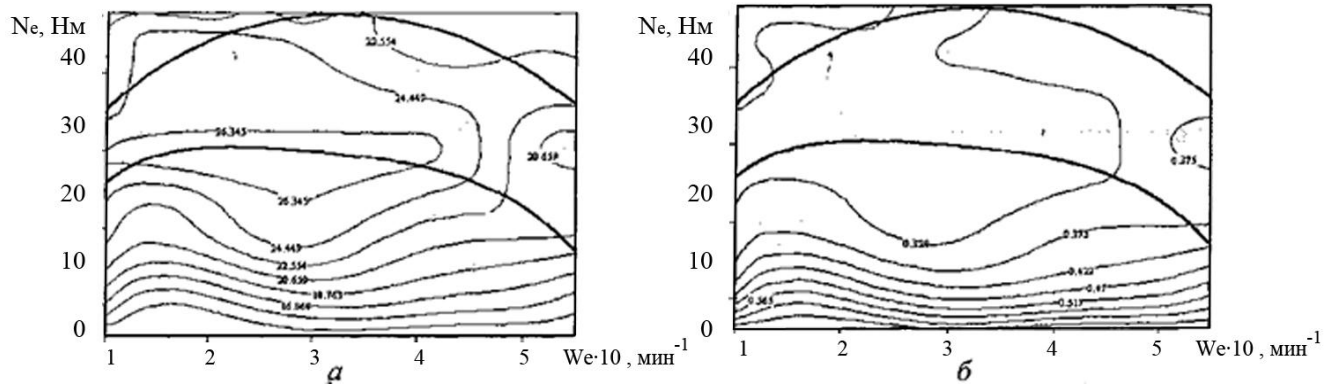


Рисунок 2.8 – Параметрические характеристики эффективности двигателя (а) и удельного расхода топлива (б) двигателя внутреннего сгорания ВАЗ-1111

Полученные данные используются для определения по заданным значениям момента на валу и скорости значения КПД и удельного расхода топлива. Значения, полученные в результате аппроксимации, могут использоваться также для дальнейших расчетов таких как: определение оптимального передаточного числа трансмиссии, выбора оптимального режима работы ГЭУ.

Таблица 2.4 – Обобщенные экспериментальные данные ГЭУ на базе ДВС ВА3-1111

P_e , МПа	0,1		0,2		0,3		0,4		0,5		0,6		0,7		0,8	
	M_e , Нм	N_e , кВт	M_e , Нм	N_e , кВт	M_e , Нм	N_e , кВт	M_e , Нм	N_e , кВт	M_e , Нм	N_e , кВт	M_e , Нм	N_e , кВт	M_e , Нм	N_e , кВт	M_e , Нм	N_e , кВт
$\frac{\text{мин}^{-1}}{\text{сек}^{-1}}$	η_e , %	η_e , %	g_e , кг/кВтч	η_e , %	g_e , кг/кВтч	η_e , %	g_e , кг/кВтч	η_e , %	g_e , кг/кВтч	η_e , %	g_e , кг/кВтч	η_e , %	g_e , кг/кВтч	η_e , %	g_e , кг/кВтч	η_e , %
1500	5,97	0,94	11,9	1,88	17,9	2,81	23,9	3,75	29,8	4,69	35,8	5,63	41,8	6,56		
157	0,7	11,3	0,43	18,6	0,35	22,6	0,32	24,7	0,3	26,4	0,34	23,6	0,34	23,3		
2000	5,97	1,25	11,9	2,5	17,9	3,75	23,9	5	29,8	6,25	35,8	7,5	41,8	8,75		
209	0,7	11,3	0,53	14,9	0,38	20,8	0,34	23,3	0,29	27,3	0,33	24	0,32	24,7		
2500	5,96	1,56	11,9	3,13	17,9	4,69	23,9	6,25	29,8	7,81	35,8	9,38	41,7	10,9	12,5	
262	0,7	11,3	0,46	17,2	0,34	23,3	0,31	25,5	0,29	27,3	0,32	24,7	0,33	24,3	22,6	
3000	5,97	1,88	11,9	3,75	17,9	5,63	23,9	7,5	29,8	9,38	35,8	11,3	41,8	13,1	15	
314,2	0,65	12,2	0,41	19,3	0,32	24,7	0,30	26,4	0,3	26,4	0,31	25,5	0,33	24	28,3	
3500	5,97	2,19	11,9	4,38	17,9	6,56	23,9	8,75	29,9	10,9	35,8	13,1	41,8	15,3	17,5	
366,3	0,67	11,8	0,42	18,8	0,35	22,6	0,31	25,5	0,30	26,4	0,32	25,1	0,34	23,3	22,6	
4000	5,97	2,5	11,9	5	17,9	7,5	23,9	10	29,8	12,5	35,8	15	41,8	17,5	20	
418,9	0,7	11,3	0,45	17,6	0,38	20,8	0,33	24	0,3	26,4	0,32	24,7	0,36	22,3	22	
4500	5,97	2,81	11,9	5,63	17,9	8,44	23,9	11,3	29,9	14,1	35,8	16,9	41,8	19,7		
471	0,7	11,3	0,47	16,8	0,39	20,3	0,34	23,3	0,35	22,6	0,35	22,6	0,35	22,6		
5000	5,97	3,13	11,9	6,25	17,9	9,38	23,9	12,5	29,8	15,6	35,8	18,8	41,8	21,9		
523,6	0,7	11,3	0,52	15,2	0,4	19,8	0,35	22,6	0,40	19,8	0,36	22,2	0,36	22,2		

Таблица 2.5 – Данные многопараметрических характеристик ГЭУ

n, мин ⁻¹	Экспериментальные данные из нагрузочных характеристик		Расчетные данные	
	PX _{ge}	BCX _{Ne}	PX _{ge}	BCX _{Ne}
	Me, НМ	Me, НМ	Me, НМ	Me, НМ
1500	28,5	42,9	29,8	41,8
2000	29,8	42,9	29,8	41,8
2500	27,4	45,3	29,8	47,7
3000	25,1	47,7	29,8	47,7
3500	29,8	47,1	29,8	47,7
4000	32,2	46,5	29,8	47,7
4500	25,4	43,0	23,9	41,8
5000	22,8	41,2	23,9	41,8

2.3. Моделирование энергоемких накопителей гибридной энергоустановки

Широкий диапазон изменения разрядного тока является характерной особенностью работы ТАБ устанавливаемых на ЭМБ или АКЭУ, что обусловлено влиянием режимов нагрузки, определяемых многофакторностью и вероятностным характером воздействия внешней среды.

Решение проблемы повышения эффективности ЭМБ и АКЭУ, как было показано ранее, напрямую связано с повышением эффективности комплекса ТАБ устанавливаемых на рассматриваемые АТС. Эффективность ТАБ зависит от целого набора выходных параметров определяющих эксплуатационные требования, а также зависит от комплекса конструкторско-технологических характеристик заложенных в устройство при проектировании и реализованных в производстве, который образует группу входных параметров. Понятно, что определение связи между группами входных и выходных параметров для сложного технического устройства, в современных условиях, должно быть проведено с учетом требований рациональности соответствующего исследовательского процесса. Реализация требований рациональности возможна при использовании современных методов моделирования ТАБ. Наиболее широкое распространение, в решении задачи математического моделирования ТАБ, получила формула Пейкерта [208]:

$$I_p^n t_p = C, \quad (2.66)$$

где n показатель степени и постоянная C – находятся опытным путем для каждого типа батареи;

I_p, t_p – ток и время разряда, или

$$Q = CI_p^{1-n}, \quad (2.67)$$

здесь Q – емкость ТАБ, отданная при разряде током $I_p = const$.

Если ток разряда I_{p1} не постоянный, то ёмкость Q_1 рассчитывается по измененной формуле Пейкерта: $Q_1 = Q(I_p/I_{p1})^{n-1}$.

Ёмкость батареи при разных периодах разряда определяется по формуле: $Q_1 = Q(t_{p1}/t_p)^m$, где $m = 1 - 1/n$.

Наиболее общий вид для всех основных типов АКБ у формулы остаточной емкости при разряде средними и малыми токами

$$Q = (Q_{ном}/B)(t_{pном}/t_p)^m, \quad (2.68)$$

где B – константа, определяемая экспериментально.

Для различных значений токов разряда емкость можно пересчитать по выражению (2.69)

$$Q = (Q_{ном}/B)(I_p/I_{pном})^{n-1}, \quad (2.69)$$

При малых значениях временных интервалов разряда и больших токах

$$Q = \left(\frac{Q_{ном}}{B}\right) \left[\left(\frac{t_p}{t_{pном}}\right)^\alpha - \frac{2Q_{ном}E_a}{t_{pном}I_k(E_{ТАБ} - U_{кр})} \right]^\beta, \quad (2.70)$$

где E_a – ЭДС ТАБ;

$I_k = E_a/R_a$ – ток к.з.;

R_a – собственное сопротивление батареи;

$U_{кр}$ – напряжение в конце цикла разрядки;

B, α, β – константы.

Выражение (2.70) для тока разрядки I_p имеет вид

$$Q = \left(\frac{Q_{ном}}{B}\right) \left[\left(\frac{I_p}{I_{pном}}\right)^\alpha - \frac{2Q_{ном}E_a}{t_{pном}I_k(E_a - U_{кр})} \right]^\beta. \quad (2.71)$$

На основании (2.71) автором предлагается математическая модель разряд-

ных характеристик аккумуляторных батарей для различных токов разрядки

$$Q = \frac{I_p}{A} \left[\left(\frac{I_p}{I_{pном}} \right)^\alpha - B \right]^\beta. \quad (2.72)$$

Математическая модель (2.72) адекватна для свинцовых, литий-ионных и никель-металл-гидридных аккумуляторных батарей. Для определения адекватности предложенных математических модели (выражения (2.67), (2.69), (2.71) и (2.72)) проведем анализ на примере разрядной кривой свинцово-кислотной ТАБ «Оптима» (ф. «Optima», США). Разрядные характеристики и удельные технические параметры свинцово-кислотной ТАБ «Оптима» приведены в таблице 2.6.

Исследования проводились для малых и средних токов разряда – от 0,7 А до 10,4 А; и рабочих токов диапазона – от 13,2 А до 123,9 А. Разрядные характеристики ТАБ «Оптима» рассчитанные по выражениям математической модели (2.67), (2.69), (2.71) и (2.72) для названных диапазонов токов представлены на рисунке 2.9. В таблице 2.7 даны результаты расчета аппроксимационных коэффициентов разрядной характеристики исследуемой батареи при различных условиях разряда.

Поскольку полученные результаты аппроксимации имеют несущественные отличия, то можно отметить, что:

- для малых токов разряда относительные погрешности трех моделей отличаются незначительно (рисунок 2.9, а, б), поэтому целесообразно пользоваться формулой - Пейкерта;

- для средних и больших токов наилучшие результаты обеспечивает предложенная модель (2.72) (рисунок 2.9 в, г), а при разряде токами всего диапазона – от минимального до тока к.з. (рисунок 2.9 д, е), относительная погрешность аппроксимации по модели (2.72) не превышает 1,15%.

Предложенные модели разрядных характеристик могут быть использованы для расчета массогабаритных параметров как для ЭМБ или АКЭУ в целом, так и для выбора ТАБ и комплекса силового электрооборудования.

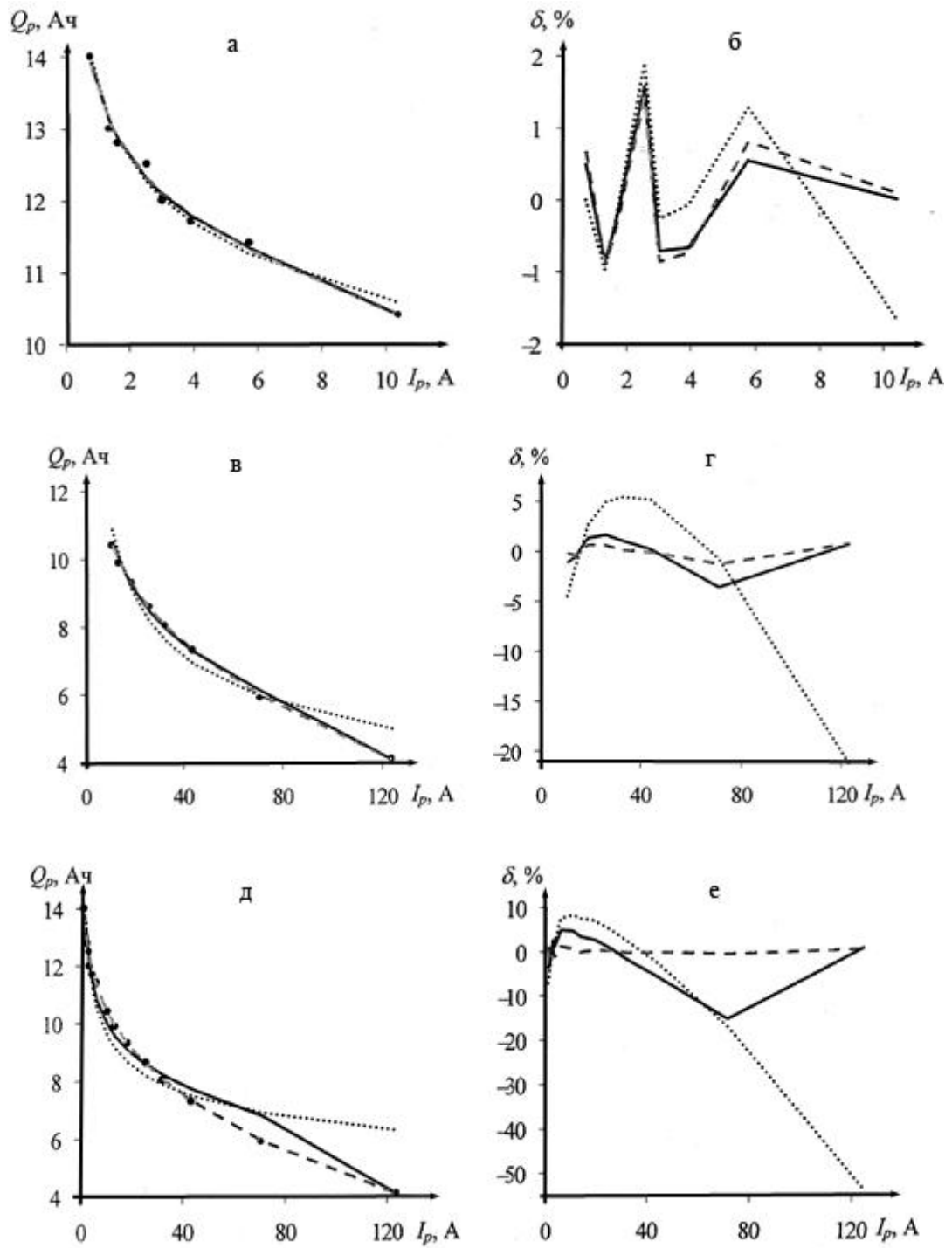


Рисунок 2.9 – Характеристики разряда ТАБ «Оптима» и погрешности их аппроксимации при различных токах разряда

Таблица 2.6 – Разрядные характеристики свинцово-кислотной ТАБ Фирмы «Оптима» США

t_p ОТ	P_p , Вт	I_p , А	Q_p , Ач	W_p , Втч	Удельные показатели			
					$P_{уд}$, Вт/л	$W_{уд}$, Втч/л	$P_{уд}$, Вт/кг	$W_{уд}$, Втч/кг
$U_{ном} = 12 В$ - 10,01 В								
2 минут	1268	123,9	4,10	42,30	665,20	22,20	264,10	8,80
5 минут	758	70,8	5,90	63,20	397,90	33,20	158,00	13,20
10 минут	482	43,6	7,30	80,30	252,80	42,10	100,40	16,70
15 минут	361	32,2	8,05	90,30	189,50	47,40	75,25	18,80
20 минут	292	25,7	8,60	91,20	153,00	51,00	60,75	20,25
30 минут	214	18,6	9,30	106,80	112,10	56,00	44,50	22,25
45 минут	154	13,2	9,90	115,65	80,90	60,70	32,10	24,10
1 час.	121	10,4	10,40	121,20	63,60	63,60	25,25	25,25
2 час.	67	5,7	11,40	134,40	35,30	70,50	14,00	28,00
3 час.	47	3,9	11,70	140,40	24,60	73,70	9,75	29,25
4 час.	36	3,0	12,00	144,00	18,90	75,55	7,50	30,00
5 час.	29	2,5	12,50	147,00	15,40	77,10	6,10	30,60
8 час.	19	1,6	12,80	153,60	10,10	80,60	4,00	32,00
10 час.	16	1,3	13,00	156,00	8,20	81,25	3,25	32,50
20 час.	8	0,7	14,00	168,00	4,40	88,15	1,75	35,00

Таблица 2.7 – Расчет коэффициентов аппроксимации ТАБ «Оптима»

Коэффициенты аппроксимации, условные разряда. Уравнение аппроксимации	Коэффициенты аппроксимации		
	от 0,7 А до 10,4 А	от 13,2 А до 123,9 А	от 0,7 А до 123,9 А
$Q = CI_p^{1-n}$	$C = 14,1246;$ $n = 1,1680.$	$C = 22,6983;$ $n = 1,3145.$	$C = 14,1246;$ $n = 1,1680.$
$Q = (Q_{\text{ном}}/B)(I_p/I_{p\text{ном}})^{n-1}$	$B = 1,0811;$ $n = 0,8320.$	$B = 0,8682;$ $n = 0,6855.$	$B = 1,0129;$ $n = 0,8959.$
$Q = \left(\frac{Q_{\text{ном}}}{B}\right) \left[\left(\frac{I_p}{I_{p\text{ном}}}\right)^\alpha - \frac{2Q_{\text{ном}}E_a}{t_{p\text{ном}}I_k(E_a - U_{\text{кр}})} \right]^\beta$	$B = 1,0429;$ $\alpha = -0,9200;$ $\beta = 0,1483.$	$B = 0,9358;$ $\alpha = -0,8805;$ $\beta = 0,2320.$	$B = 1,0041;$ $\alpha = -4,1880;$ $\beta = 0,0223.$
$Q = \frac{It_{\text{ном}}}{A} \left[\left(\frac{I}{I_{\text{ном}}}\right)^\alpha - B \right]^\beta$	$A=0,4594;$ $\alpha = -0,6537;$ $\beta = 0,5132;$ $B = 0,0288.$	$A=0,4796;$ $\alpha = -0,9781;$ $\beta = 1,1724;$ $B = 0,0288.$	$A=0,4988;$ $\alpha = -2,1309;$ $\beta = 0,5132;$ $B = 0,0288.$

2.4 Исследование и моделирование бортовых электросиловых накопителей

Конденсаторные технологии создания импульсных источников питания находят все большее применение в автомобильной промышленности. При этом создание электросиловых накопителей электростатического типа для ЭМБ и АКЭУ является весьма перспективным направлением.

Одними из первых, использовать емкостные накопители энергии (ЕНЭ) совместно с ТАБ для решения транспортных проблем, предложили ученые Московского государственного машиностроительного университета. В отличие от традиционных конструкций ТАБ, заряд которых продолжается в течении 6 – 8 часов, соответствующий процесс для ЕНЭ длится несколько минут.

Особенностью ЕНЭ является возможность организации в ЭМБ или АКЭУ информационной системы, позволяющей проводить мониторинг энергетического состояния автомобиля в реальном масштабе времени. С этой целью на комбинации приборов устанавливается специальный информационный указатель.

Таким образом, можно сделать первичный вывод о том, что применение ЕНЭ на автомобилях с электрическими технологиями обеспечивает повышение эксплуатационной эффективности за счет улучшения зарядных процессов, а также информативности управления.

На основе вышеизложенного, переходим к процессу моделирования ЕНЭ. В основу математической модели емкостных накопителей были положены результаты проведенных экспериментальных исследований. Алгоритм экспериментальных испытаний ЕНЭ заключался в их циклической зарядке и разряде. Накопитель заряжался от источника постоянного тока, а разряд осуществлялся на постоянную нагрузку. Токи и напряжения фиксировались измерительными приборами.

Величины запасенной энергии, емкости накопителя, КПД вычислялись по следующим формулам

$$U_{\text{ен}} = \frac{1}{C_{\text{ен}}} \int_0^{t_K} i_3 dt = \frac{I_3 t_3}{C_{\text{ен}}}; \quad (2.73)$$

запасенная энергия накопителя

$$w_3 = C_{\text{ен}} U_{\text{ен}}^2 / 2; \quad (2.74)$$

энергия разряда батареи

$$w_p = \int_0^{t_p} i_p U_p dt = \int_0^{t_p} p_p dt, \quad (2.75)$$

где p_p – мощность разряда;

величина КПД

$$\eta_{ен} = w_p/w_з; \quad (2.76)$$

емкость накопителя

$$C_{ен} = \frac{K \varepsilon_0 A}{d}, \quad (2.77)$$

здесь K – постоянная диэлектрика;

ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость;

A – эффективная площадь конденсатора;

d – расстояние между обкладками конденсатора.

Из соотношений 2.73-2.77 следует, что увеличение удельной запасаемой энергии возможно либо за счет увеличения емкости $C_{ен}$, либо за счет увеличения напряженности электрического поля $E_{ен}$. В настоящее время экспертным сообществом активно разрабатываются направления по одновременной оптимизации величин K , A/d и $E_{ен}$. Для реализации поставленной задачи, можно выделить два подхода. Первый состоит в создании конденсаторов на основе молекулярных пленок с высокими значениями диэлектрической проницаемости допускающие высокие значения электрической напряженности. Но, как показала практика, конденсаторы с высокими напряженностями электрического поля малопригодны для электрических транспортных средств. Второй заключается в оптимизации соотношения A/d .

Технические требования к ЕНЭ, как правило, включают следующие основные пункты:

- накопитель должен выдерживать требуемый срок разряда;
- напряжение ЕНЭ при полном заряде должно в 2 – 3 раза превышать номинальное напряжение двигателя;
- удельная по массе энергия – не менее 20000 Дж/кг;
- максимальный саморазряд ЕНЭ не более 20% в сутки;

- срок службы – не менее 10 лет.

Для емкостных накопителей характерно, что внутреннее сопротивление с изменением заряда, практически не меняется. Следовательно, наклон вольтамперных характеристик с увеличением разряда остается постоянным. Напряжение батареи ЕНЭ может быть представлено уравнением

$$U_{ен} = E_{ен} - I_{ен}R_{ен}, \quad (2.78)$$

где $U_{ен}$ – напряжения на выходе ЕН;

$E_{ен}$ – ЭДС емкостного накопителя;

$I_{ен}$ – ток батареи ЕНЭ;

$R_{ен} = R_e m/n_e$ – внутреннее сопротивление батареи ЕН;

m – количество последовательно включенных элементов в батарее;

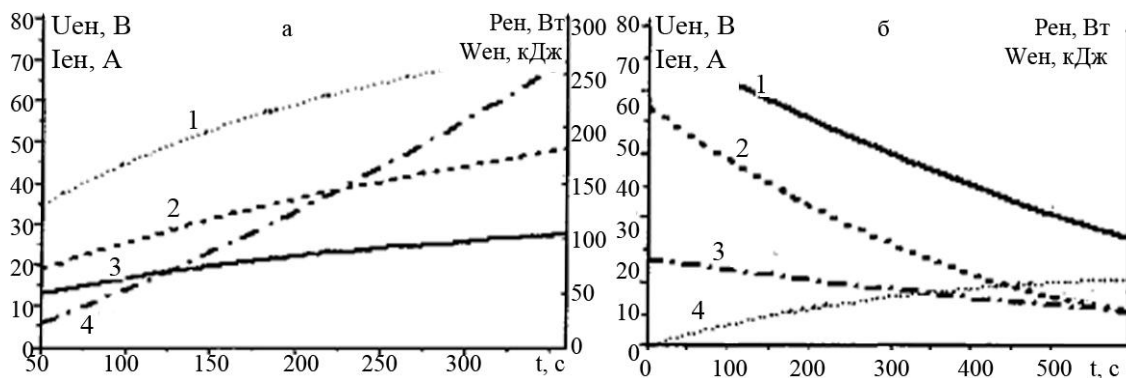
n_e – количество параллельно включенных элементов в батарее;

$R_{ен}$ – внутреннее сопротивление элемента.

В качестве объекта исследования рассмотрим батарею ЕНЭ 24ТМ-50. Накопитель имеет форму параллелепипеда 360x125x235мм, массой 18 кг. Номинальное напряжение 28 вольт. Экспериментальные зарядно-разрядные характеристики батареи представлены на рисунке 2.10.

КПД процесса заряд-разряд накопителя определяется отношением отданной им энергии к полученной в определенном диапазоне изменения напряжения

$$\eta_{ен} = W_{енр}/W_{енз}. \quad (2.79)$$



а – заряд при $I_p=50$ А; б – разряд при $R_H = 3,5$ Ом; 1 – $U_{ен}$; 2 – мощность ЕНЭ; 3 – $I_{ен}$; 4 – энергия ЕНЭ

Рисунок 2.10 – Зарядно-разрядные характеристики батареи ЕНЭ 24ТМ-50

Потери энергии в накопителе можно оценить по формуле

$$\Delta w = I_3^2 R_{\text{ен}} t_3 + I_p^2 R_{\text{ен}} t_p, \quad (2.80)$$

где $R_{\text{ен}} = \frac{\Delta w}{I_3^2 t_3 + I_p^2 t_p}$ среднее эквивалентное внутреннее сопротивление накопителя

t_3, t_p – время зарядки и разрядки соответственно.

Моделирование процессов в электромеханических системах с емкостными накопителями.

Рассмотрим процессы в цепи нагрузки ЕНЭ на тяговый электродвигатель, считая, что электродвигатель работает при постоянном моменте. Будем считать, что емкостной накопитель заряжен до напряжения $U_{\text{ен}} = U_{\text{макс}}$. Как было отмечено ранее, ЕЭН имеет неизменное внутреннее сопротивление $R_{\text{ен}}$. Ток якоря при постоянстве момента нагрузки электродвигателя будет неизменным.

Напряжение на зажимах ЕНЭ $U_{\text{ен}}$ при постоянном токе, будет иметь линейную зависимость от времени разряда t_p

$$U_{\text{ен}} = U_{\text{макс}} - \frac{I_{\text{ен}}}{C_{\text{ен}}} t, \quad (2.81)$$

где $U_{\text{макс}}$ – напряжение ЕНЭ в начале процесса разряда.

$U_{\text{макс}}$ определяется номинальным напряжением ТЭД ($U_{\text{н}}$) $U_{\text{макс}} > (2...3)U_{\text{н}}$. Номинальное питающее напряжение электродвигателя обеспечивается ШИМ регулятором. Им же осуществляется и регулирование этого напряжения в процессе движения ЭМБ или гибридного автомобиля.

Для определенного значения количества электроэнергии Q_y емкость $C_{\text{ен}}$ накопления для q циклов можно рассчитать по выражению

$$C_{\text{ен}} = \frac{q \Sigma i_{\text{ен}i} t}{U_{\text{макс}}} \quad (2.82)$$

Необходимо иметь в виду, что при разряде ЕНЭ от $U_{\text{макс}}$ до $U_{\text{с}}$ отдаваемая энергия определяется формулой

$$W_{\text{ен}} = W_{\text{макс}} \left[1 - \frac{U_{\text{ен}}^2}{U_{\text{макс}}^2} \right]. \quad (2.83)$$

Так, например, при разряде батареи до половины от начального напряжения отдается 75% начальной энергии, а при $U_{EH} = 0,3 U_{\max}$ – 91%. Процесс снижения напряжения на емкостной батарее описывается уравнением

$$U_{EHi} = (U_{EHi} + I_{EHi}R_{EHi}) \left(1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{T_i}\right)\right) + (U_{EHi-1} + I_{EHi}R_{EHi})\exp\left(\frac{-\Delta t}{T_i}\right) - I_{EHi}R_{EHi}, \quad (2.84)$$

где U_{EHi-1} , U_{EHi} – напряжения на батарее в начале и в конце i -го временного расчетного интервала;

$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ – временной интервал;

I_{EHi} – средний ток батареи в i -м интервале;

$T_i = C_{EH}R_{\Sigma p}$ – постоянная разряда, $R_{\Sigma p}$ – полное активное сопротивление.

Мощность и потери в ЕНЭ:

$$P_{EH} = E_{EH}i = \frac{E_{EH}^2}{R_{\Sigma p}} \exp\left(\frac{-t}{R_{\Sigma p}C_{EH}}\right); \quad (2.85)$$

$$\Delta p = i^2 R_{\Sigma p} = \frac{U_{EH}^2}{R_{\Sigma p}} \exp\left(\frac{-2t}{R_{\Sigma p}C_{EH}}\right); \quad (2.86)$$

$$P_{пол} = U_{EH}i = \frac{U_{EH}^2}{R_{\Sigma p}} \left(\exp\left(\frac{-t}{R_{\Sigma p}C_{EH}}\right) - \exp\left(\frac{-2t}{R_{\Sigma p}C_{EH}}\right) \right), \quad (2.87)$$

здесь P_{EH} – потенциальная мощность накопителя;

Δp – электрические потери в ТЭД и батарее;

$P_{пол}$ – полезная мощность.

Данные выражения могут быть использованы для анализа режима разряда с постоянным напряжением. В течение некоторого промежутка времени падение напряжения на батарее не превышает 1-2%. Для этого периода можно сделать допущение, что напряжение ЕНЭ поддерживается постоянным.

При питании ТЭД используется не вся запасенная энергия ЕНЭ. При снижении напряжения до 30-40% от начального уровня дальнейшая работа накопителя на ТЭД невозможна. Поэтому необходимо проанализировать изменение расходуемой энергии с целью выбора номинальных параметров ТЭД для повышения запаса хода ЭМБ или АКЭУ. Уравнения энергетического баланса имеют вид:

$$W_{EH} = \frac{U_{EH}^2}{R_{\Sigma p}} \int_0^{t_p} \exp\left(\frac{-t}{R_{\Sigma p}C_{EH}}\right) \cdot dt; \quad (2.88)$$

$$\Delta w = \frac{U_{EH}^2}{R_{\Sigma p}} \int_0^{t_p} \exp\left(\frac{-2t}{R_{\Sigma p} C_{EH}}\right) \cdot dt; \quad (2.89)$$

$$W_{\text{пол}} = \frac{U_{EH}^2 C_{EH}}{2} \left(1 + \exp\left(\frac{-2t}{R_{\Sigma p} C_{EH}}\right) - 2 \exp\left(\frac{-t_p}{R_{\Sigma p} C_{EH}}\right) \right), \quad (2.90)$$

где W_{EH} – потенциальная энергия накопителя при полной зарядке;

Δw – энергетические потери в электродвигателе и батарее;

$W_{\text{пол}}$ – отдаваемая энергия в электроприводе.

2.5 Выводы по главе

При реализации задачи моделирования основных процессов ЭМБ и автомобилей с КЭУ представлены методологические инструменты проектирования соответствующих АТС: уравнения циклического движения автомобилей; методика построения топограмм – многопараметровых характеристик двигателя внутреннего сгорания; методология моделирования энергоемких накопителей гибридной энергоустановки; проведено исследование и моделирование бортовых электросиловых накопителей.

В рамках решения соответствующих задач, с помощью инструментов компьютерного моделирования, получены результаты по повышению технических характеристик ТАБ ЭМБ и АКЭУ работающих в комплексе с ЕНЭ. При исследовании бортовых электросиловых накопителей выделены уравнения энергетического баланса ЕНЭ. Проведено моделирование заряд-разрядного процесса емкостного накопителя энергии, что позволило определить направление работы для оптимизации КПД соответствующих комплексных энергетических систем электромобиля и автомобиля с КЭУ.

Предложенные автором уравнения для расчета разрядных характеристик АКБ и ЕНЭ позволяют сделать обоснованный выбор типа накопителя энергии для электротранспортного средства и решить комплексную задачу синтеза силовой установки АТС.

Полученные результаты обеспечивают возможность для перехода к решению следующей задачи, связанной с математическим описанием, и имитацион-

ным моделированием ТЭД, а также процессов управления электроприводами ЭМБ и АКЭУ с целью обеспечения повышения эксплуатационных характеристик электромобилей и автомобилей с гибридными силовыми установками.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ЭМБ И АКЭУ

3.1 Актуализация задачи моделирования электроприводов ЭМБ и АКЭУ

Решение комплекса вопросов рационального управления преобразованием энергии в тяговой системе электропривода (ТСЭ) ЭМБ и АКЭУ связано с рядом ключевых факторов: специфичность ЭМБ и АКЭУ как АТС с автономной энергетической установкой; многообразием и случайностью режимов движения автомобилей в общем, и ЭМБ и АКЭУ в частности. Перечисленные особенности работы ТСЭ требуют использования электроприводов с различными ТЭД, мощность которых должна быть согласована с мощностью ТАБ.

Разработка методов и средств обеспечения необходимых показателей качества и надежности функционирования автономных электроприводов и оптимального управления ЭМБ и АКЭУ может быть выполнена на основе исследования взаимосвязей процессов и закономерностей в ТСЭ.

Потери мощности в приводном двигателе и источнике питания в значительной степени определяются алгоритмом управления силовым преобразователем. Особо актуально для ЭМБ и АКЭУ встают вопросы оптимизации режимов работы ТЭД и согласования работы силовых преобразователей и тягового электропривода по критерию минимума потерь, что в настоящее время не в полной мере исследовано аналитически.

Создание ТСЭ с высокими энергетическими показателями предполагает использование силовых агрегатов в интервалах заданных скоростей и моментов нагрузки с минимальными потерями. При этом должны учитываться ограничения, налагаемые на значения напряжений и токов, а также потребляемой от ТАБ мощности. Требуемый режим движения ЭМБ и АКЭУ обеспечивается организацией соответствующих режимов питания ТЭД.

В данной главе рассматриваются вопросы управления электрическими машинами в тяговых приводах ЭМБ и АКЭУ [163, 165]. Специфическими особенностями тяговых приводов являются жесткие требования, предъявляемые к массога-

баритным и энергетическим показателям электропривода в целом и электрической машины в частности. Машины, используемые в этих приводах, как правило, высокоскоростные, т.е. спроектированы на повышенные частоты (до 400 – 500 Гц) и предполагают глубокое регулирование магнитного потока. В связи с этим, в системах тягового привода целесообразно выделять два контура регулирования – внешний по частоте вращения и внутренний (подчиненный) контур регулирования токов. Такое построение системы управления обусловлено тем, что длительности переходных процессов в цепях машины несоизмеримо малы в сравнении с длительностью переходных процессов изменения скорости ЭМБ или АКЭУ, поэтому, как уже отмечалось выше, независимо от вида движения автомобиля на электрических технологиях (разгон, торможение, движение с установившейся скоростью) можно считать, что электрическая машина в электромагнитном отношении находится всегда в статическом (установившемся) режиме работы. Последнее обстоятельство позволяет формировать заданные значения токов для внутреннего контура, исходя из статических зависимостей машины по критерию минимума потерь энергии.

Формирование заданных значений токов, естественно, должно происходить с учетом ограничений, налагаемых на максимальные значения фазного тока и напряжения силового преобразователя. Эти ограничения всегда существуют в реальных системах электропривода и обусловлены как предельными возможностями элементов силового преобразователя, так и источника энергии. Для приводов транспортных средств с автономными источниками энергии, например такими, как аккумуляторная батарея, существенным также является ограниченность мощности источника.

Таким образом, для обеспечения эффективности эксплуатации ТЭД ЭМБ и АКЭУ, требуется решение задачи предельного использования электрической машины по мощности во всем диапазоне скоростей и моментов нагрузки с минимально возможным для каждого режима потерями. Ограничения налагаются на максимальные значения фазного напряжения, тока и мощности, потребляемой от источника энергии.

Для всех типов машин, используемых в настоящее время в тяговом электроприводе решение поставленной задачи возможно. При этом необходимо учесть два ключевых момента. Первый – учет собственных параметров для каждого типа электрической машины, т.е. определения оптимальных величин управляющих воздействий для получения требуемых характеристик. Второе – необходимо вскрыть алгоритмы управления преобразовательными устройствами, формирующими заданные управляющие воздействия, позволяющие снизить потери в преобразователе, а, следовательно, и мощность, потребляемую от источника энергии.

Одним из способов решения первой части поставленной задачи является оптимизация управляющих воздействий по методу векторно-токовой оптимизации. В качестве решения второй части поставленной задачи осуществляется разработка методологии и выбор на ее основе алгоритмов управления для тягового привода.

3.2 Оптимизация управляющих воздействий по методу векторно-токовой оптимизации

Для обобщенной машины возможно независимое регулирование четырех выходных переменных. В тяговом приводе основной регулируемой переменной является развиваемый машиной электромагнитный момент, поэтому оставшиеся три степени свободы можно использовать для одновременного регулирования других показателей машины, например для минимизации потерь. Для этой цели можно воспользоваться методом векторно-токовой оптимизации (МВТО). Сущность метода заключается в следующем. На первом этапе выбирается желаемый критерий оптимизации. На втором – в прямоугольной системе координат (u, v) , связанной с ротором машины или с каким-либо из векторов ее электромагнитных переменных, определяются оптимальные, с точки зрения выбранного критерия, векторы токов статора и ротора, которые впоследствии реализуются соответствующими токовыми системами [165].

Рассмотрим применение МВТО в случае двумерного управления, т.е. когда имеется только одна дополнительная степень свободы для реализации какого-либо из критериев оптимизации. В тяговом приводе ЭМБ и АКЭУ основным критерием оптимизации является критерий минимума потерь. Обычно в установившихся режимах движения автомобилей на электрических технологиях выполнение данного критерия возможно для всего диапазона скоростей. В тоже время для тягового электропривода необходимым условием во время разгона или экстренного торможения является возможность развивать максимальные значения мощности и момента на валу машины. Эти режимы обеспечиваются при максимальных значениях модулей векторов тока и напряжения. Поэтому критериями оптимальности в этих случаях должны быть или максимизация мощности при фиксированном значении модуля соответствующего обобщенного вектора напряжения $|U_S|$ или максимизация момента при фиксированном значении модуля соответствующего обобщенного вектора тока $|I_S|$.

Используя известные уравнения обобщенной машины можно показать, что выражение для любой из выше указанных оптимизируемых величин можно записать в виде

$$A = \Theta \times F(K), \quad (3.1)$$

где Θ – физическая величина (электромагнитный момент, модуль тока или напряжения), при фиксированном значении которой необходимо найти экстремум оптимизируемой величины A (потери, электромагнитный момент или мощность соответственно);

$F(K)$ – некоторая функция, которая определяется по уравнениям статического режима и зависящая от параметров машины, угловой частоты вращения и коэффициента связи K , который представляет собой отношение компонент обобщенного вектора тока $|I_S|$ в выбранной системе координат (U, \underline{v}) .

Оптимальное значение коэффициента связи, соответствующее работе машины в режиме минимума потерь ($K = K_{omn}$), в режиме максимальной мощности ($K = K_U$) или в режиме максимального момента ($K = K_I$), можно определить из условия $dA/dK = 0$. После этого по вычисленному значению коэффициента связи

и по требуемой величине электромагнитного момента определяются компоненты оптимального вектора тока.

В отношении коэффициента связи K выделяются следующие режимы работы: если M и n таковы, что достигаются при $|I_s| < |I_s|_{max}$ и $|U_s| < |U_s|_{max}$, то машина может работать в режиме минимальных потерь, т.е. K должен быть равен K_{opt} ; если M и n таковы, что достигаются только при $|U_s| = |U_s|_{max}$, $|I_s| < |I_s|_{max}$ и $K \neq K_{onm}$, то величина K должна выбираться из диапазона $K_{onm} - K_U$ в функции поддержания напряжения на уровне $|U_s| = |U_s|_{max}$; если M и n таковы, что достигаются только при $|I_s| = |I_s|_{max}$ и $|U_s| < |U_s|_{max}$ и $K \neq K_{onm}$, то величина k должна выбираться из диапазона $K_{onm} - K_I$ в функции ограничения тока на уровне $|I_s| = |I_s|_{max}$; если M и n таковы, что достигаются только при $|I_s| = |I_s|_{max}$ и $|U_s| = |U_s|_{max}$ и $K \neq K_{onm}$, то величина $K = K_{UI}$ должна вычисляться из уравнения для электромагнитного момента машины при указанных ограничениях.

При этом, как следует из (3.1), потери во втором и третьем режимах для промежуточных значений K , отличных от K_I или K_U , будут больше минимальных (т.е. соответствующих $K = K_{onm}$, но меньше чем при $K = K_I$ или $K = K_U$. Следовательно, в системе управления должен реализовываться принцип формирования режима работы машины по критерию безусловного минимума энергетических потерь с автоматическим переходом к условному минимуму потерь при заданных ограничениях тока и напряжения.

Из сказанного следует структурная схема электропривода, изображенная на рисунке 3.1, где 1 – формирователь заданных токов (ФЗТ); 2 – формирователь статического режима (ФСР), т.е. блок формирования текущих значений коэффициента связи K ; 3, 4 – регуляторы подчиненных контуров тока для статора и ротора соответственно.

3.2.1 Управление асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором.

Дифференциальные уравнения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором, записанные в ортогональной системы координат $(U, v) = (d, q)$, ось d ко-

торой ориентирована по направлению вектора потокосцепления ротора, а ось q в опережающем ее на 90° направлении, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left[R_r \frac{L_m}{L_r^2} \psi_d - (R_r + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}) i_d \right] + \omega_\psi i_q + \frac{U_d}{\sigma L_s} + \frac{\omega L_m}{\sigma L_r L_s} \psi_q \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{-1}{\sigma L_s} \left[\omega \frac{L_m}{L_r} \psi_d + (R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2}) i_q \right] - \omega_\psi i_d + \frac{U_d}{\sigma L_s} - \frac{\omega L_m}{\sigma L_r L_s} \psi_d \\ \frac{d\psi_d}{dt} = R_r \frac{L_m}{L_r} i_d - \frac{R_r}{L_r} \psi_d + (\omega_\psi - \omega) \psi_q \\ \frac{d\psi_q}{dt} = R_r \frac{L_m}{L_r} i_q - \frac{R_r}{L_r} \psi_q - (\omega_\psi - \omega) \psi_d \end{cases} \quad (3.2)$$

где $i_d, i_q, \psi_d, \psi_q = 0$ – координаты векторов I_s тока статора и ψ потокосцепления ротора;

R_s, R_r – активное сопротивление обмоток фаз статора и ротора (приведенного к статору);

$\sigma = \frac{1-L_m^2}{L_s L_r}$ – полный коэффициент рассеяния;

$L_s = L_m + L_1, L_r = L_m + L_2$ – полная индуктивность фаз статора и ротора (L_1, L_2, L_m – соответственно фазные индуктивности рассеяния статора, приведенная к статору индуктивность рассеяния ротора и индуктивность контура намагничивания);

$\omega = p \times n$ – угловая частота вращения ротора, выраженная в электрических радианах (p – число пар полюсов машины, n – угловая скорость ротора в метрических радианах);

U_d, U_q – координаты обобщенного вектора U_s напряжения статора машины, которые в дальнейшем будем рассматривать как компоненты вектора управляющих воздействий в системе (3.2).

Электромагнитный момент, развиваемый машиной, равен

$$M = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3.3)$$

В соответствии с предлагаемым методом представим компоненту i_d в виде произведения компоненты i_q на некоторый коэффициент связи K

$$i_d = K \cdot i_q \quad (3.4)$$

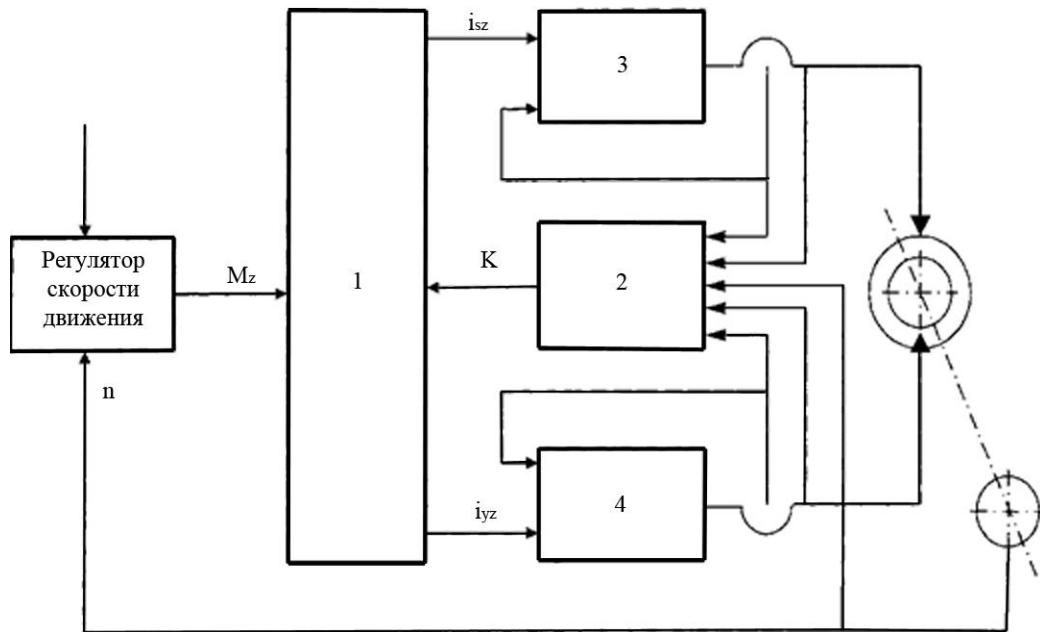


Рисунок 3.1 – Структурная схема электропривода

Из предпоследнего уравнения системы (3.2) можно получить, что в статическом режиме работы

$$\Psi_d = L_m \cdot i_d \quad (3.5)$$

Поэтому из (3.5) и последнего уравнения системы (3.2)

$$K = \frac{R_r}{L_r} \cdot \frac{1}{(\omega_\psi - \omega)} = \frac{R_r}{X_r} \cdot \frac{1}{\beta} \quad (3.6)$$

где X_r – полное индуктивное сопротивление ротора;

β – параметр абсолютного скольжения.

Используя (3.3), (3.4), (3.5), (3.6), а также уравнения, выражающие компоненты вектора потокосцепления ротора через компоненты векторов токов статора и ротора, можно получить выражения для электромагнитного момента M и для потерь P в меди статора и ротора через параметры машины, модуль вектора тока статора и коэффициент связи K

$$M = \frac{3}{2} \cdot p \frac{L_m^2}{L_r} \cdot \frac{K}{1+K^2} |I_s|^2 \quad (3.7)$$

$$P = 2 \frac{L_r M}{p L_m^2} \left[R_s \frac{1+K^2}{K} + R_r \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 \frac{1}{K} \right] \quad (3.8)$$

Чтобы получить аналогичное выражение для мощности W , развиваемой машиной, вначале необходимо выразить средние значения компонент U_d и U_q век-

тора напряжения статора через параметры машины, коэффициент связи K и развиваемый машиной момент, а затем воспользоваться связью компонент вектора напряжения с его модулем. Из (3.2) видно, что в статическом режиме работы среднее значения компонент векторов напряжения и тока связаны соотношениями

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d - \sigma L_s \left(\omega + \frac{R_r}{L_r} \cdot \frac{i_q}{i_d} \right) i_q \\ U_q = \omega L_s i_d + \left(R_s + R_r \cdot \frac{L_s}{L_r} \right) i_q \end{cases} \quad (3.9)$$

Используя (3.9), (3.4) и (3.7), получаем

$$\begin{cases} U_d = \left[R_s K - \sigma L_s \left(\omega + \frac{R_r}{L_r} \cdot \frac{1}{K} \right) \right] \sqrt{\frac{L_r M}{p L_m^2 K}} \\ U_q = \left[\omega L_s K + \left(R_s + R_r \cdot \frac{L_s}{L_r} \right) \right] \sqrt{\frac{L_r M}{p L_m^2 K}} \end{cases} \quad (3.10)$$

Из этих соотношений с учетом $W = M \cdot n$ и $|U_s| = U_d^2 + U_q^2$ имеем

$$W = \frac{\omega \frac{L_m^2 |U_s|^2}{L_s L_s^2 (\sigma^2 + K^2)} K}{\omega^2 + 2\omega \frac{R_s(1-\sigma)K + R_r \frac{L_s}{L_r} \left(\frac{\sigma^2}{K} + K \right) + R_s^2 K^2 + \left(R_s + R_r \frac{L_s}{L_r} \right)^2 + \left(\sigma R_r \frac{L_s}{L_r} \right)^2 \frac{1}{K^2} - 2\sigma R_s R_r \frac{L_s}{L_r}}{L_s (\sigma^2 + K^2) + L_s^2 (\sigma^2 + K^2)} \quad (3.11)$$

В соответствии с МВТО, из уравнений (3.7) и (3.8) нетрудно получить соответствующие значения коэффициентов связи:

$$\text{из (3.7): } K_1 = \pm 1 \quad \left(\frac{dM}{dK} = 0 \right),$$

из (3.8)

$$K_{\text{опт}} = \pm \sqrt{1 + \frac{R_r}{R_s} \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2} \quad \left(\frac{dP}{dK} = 0 \right), \quad (3.12)$$

а из уравнения (3.11) получаем, что величина $K=K_U$ задается уравнением четвертой степени

$$K^4 + \xi_1 K^2 + \xi_2 K + \xi_3 = 0 \quad \left(\frac{dW}{dK} = 0 \right),$$

где:

$$\xi_1 = \frac{-2 \frac{R_s R_r}{L_s L_r} (1 - \sigma) - \left(\frac{R_s}{L_s} \right)^2 - \left(\frac{R_r}{L_r} \right)^2 - (\sigma \omega)^2}{\omega^2 + \left(\frac{R_s}{L_s} \right)^2}$$

$$\xi_2 = \frac{4\sigma^2\omega \frac{R_r}{L_r}}{\omega^2 + \left(\frac{R_s}{L_s}\right)^2}$$

$$\xi_3 = -3 \frac{\left(\frac{\sigma R_r}{L_r}\right)^2}{\omega^2 + \left(\frac{R_s}{L_s}\right)^2} \quad (3.13)$$

Таким образом, величина K_U является функцией частоты вращения.

Для вычисления значений $K = K_{UI}$, соответствующих работе в условиях одновременного ограничения модулей векторов статорного тока и направления, воспользуемся уравнением (3.7) при $|I_s| = |I_s|_{\max}$

$$K_{UI} = \frac{L_m^2}{2L_r} p \frac{|I_s|_{\max}^2}{M} \pm \sqrt{\left(\frac{L_m^2}{2L_r} p \frac{|I_s|_{\max}^2}{M}\right)^2 - 1} \quad (3.14)$$

Полученное уравнение показывает, что при максимальном значении момента $K_{UI} = 1$, а также при моментах, меньших максимального, K_{UI} принимает два значения: одно из них больше единицы, а другое – меньше. Таким образом, при уменьшении момента, с одной стороны, происходит возрастание значения K_{UI} , которое, очевидно, не должно превышать величины K_{opt} , а с другой стороны, происходит уменьшение значения K_{UI} , что, в свою очередь, может привести к режимам работы машины со скольжениями, превышающими критическое (оба знака перед корнем соответствуют двигательному режиму работы при $M > 0$ и генераторному при $M < 0$). Поэтому очевидно, что величина K_{UI} должна лежать в диапазоне

$$K_{opt} \geq K_{UI} \geq K_U \quad (3.15)$$

Уравнение для предельных механических характеристик электропривода $n=f(M)$ при заданном ограничении модуля вектора напряжения статора (напряжения источника питания) и различных уровнях потерь в меди машины (т.е. при различных значениях коэффициента связи K) можно получить из выражения (3.11)

$$n = -\frac{R_s(1-\sigma)K + R_r \frac{L_s}{L_r} \left(\frac{\sigma^2}{K} + K\right)}{pL_s(\sigma^2 + K^2)} \pm \sqrt{\left[\frac{R_s(1-\sigma)K + R_r \frac{L_s}{L_r} \left(\frac{\sigma^2}{K} + K\right)}{pL_s(\sigma^2 + K^2)}\right]^2 - \frac{R_s^2 K^2 + \left(R_s + R_r \frac{L_s}{L_r}\right)^2 + \left(\sigma R_r \frac{L_s}{L_r}\right)^2 \frac{1}{K^2} - 2\sigma R_s R_r \frac{L_s}{L_r} \frac{L_m^2}{L_r} p \frac{|U_s|^2}{M} K}{p^2 L_s^2 (\sigma^2 + K^2)}} \quad (3.16)$$

Знак «+» соответствует двигательному режиму работы машины, а «-» - генераторному.

На рисунке 3.2 приведено наиболее характерное расположение границ зон работы машины: с минимумом потерь при $K = K_{opt}$ (кривая 1); минимумом тока статора при $K = K_I$ (кривая 2); с максимальной мощностью при $K = K_U$ (кривая 3); при одновременном ограничении модулей векторов напряжения и тока статора при $K = K_{UI}$ (кривая 4). Отрезок кривой 3 выше точки касания с кривой 4, соответствует работе машины с $|U_s| = |U_{s|max}$, $K = K_U$, $|I_s| < |I_{s|max}$, т.е. моменты, соответствующие этому отрезку кривой 3, достигаются при токах меньших $|I_{s|max}$.

На рисунке, для значений K можно выделить три зоны:

первая зона, ограниченная осями координат, максимальной скоростью n_{max} , кривой 1 и моментом M_1 . Величина M_1 определяется из (3.7) при $K = K_{opt}$ и предельном значении тока вентилей преобразователя, т.е. $|I_s| = |I_{s|max}$. Зона, в которой при заданном $|U_s|_{max}$ возможно выполнение условия минимума потерь. При этом значение K должно быть неизменно равно $K_{opt} = const$;

вторая зона, ограниченная нижней ветвью кривой 4 (нижняя ветвь кривой 4 соответствует значениям K_{UI} , которые получаются по (3.14) при знаке «+» перед корнем) и вертикальными линиями, соответствующими максимальным значениям моментов в режиме минимума потерь M_1 и в режиме минимума тока статора M_{max} при $|I_s| = |I_{s|max}$. Здесь, при увеличении момента нагрузки, коэффициент K должен варьироваться от $K = K_{opt}$ или $K = K_{UI}$ до $K = K_I$ в функции ограничения тока статора на уровне $|I_{s|max}$;

третья зона, ограничения кривой 1, максимальной скоростью n_{max} , кривой 3 и кривой 4. В этой зоне, как и во второй зоне, с увеличением момента нагрузки, коэффициент K должен изменяться от текущего значения частоты вращения в функции ограничения $|U_s|$ на уровне $|U_{s|max}$, причем, как видно из (3.8), это соответствует монотонному возрастанию потерь в меди от минимально возможных, при $K = K_{opt}$ или K_U .

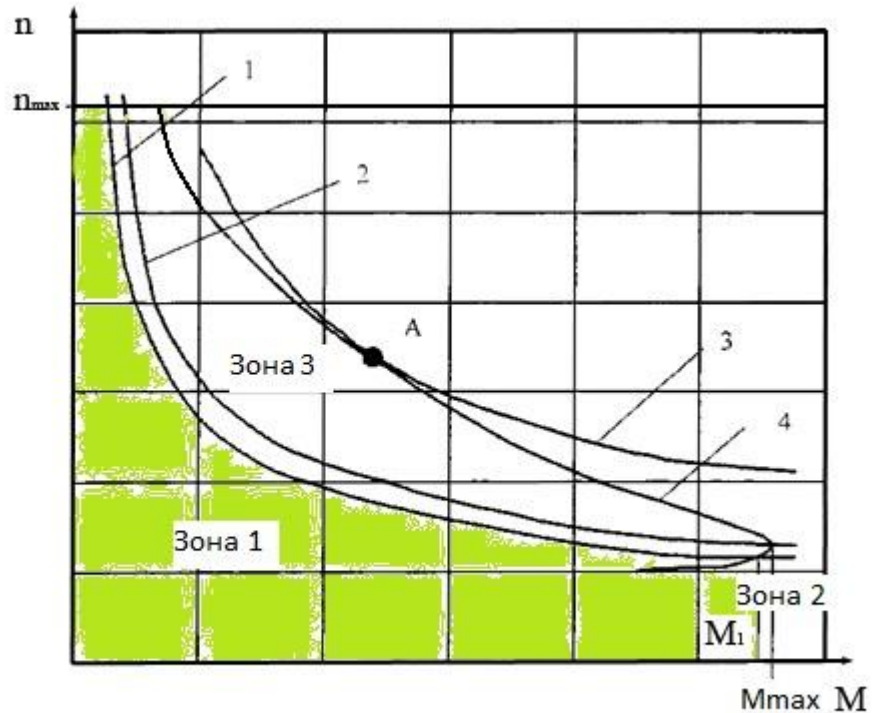


Рисунок 3.2 – Характерное расположение границ зон работы асинхронной машины

В связи с этим появляется возможность синтезировать такой алгоритм выбора значений K для каждой точки (n, M) , чтобы возрастание потерь было минимальным, т.е., чтобы заданные значения частоты вращения и момента достигались при максимально возможных значениях коэффициента связи K , больших или равных K_U или K_{UI} (в зависимости от n), не превышающих K_{opt} . Нетрудно видеть, что необходимость уменьшения величины K обусловлена только ограниченностью напряжения источника питания или коммутационными свойствами силового преобразователя. Отсюда вывод: величина K во второй зоне должна выбираться в функции поддержания требуемого значения модуля вектора тока статора $|I_s|$ на уровне $|I_{s|max}$, а в третьей зоне в функции поддержания $|U_s|$ на уровне $|U_{s|max}$.

Из сказанного следует структура цепи автоматического управления установкой оптимального статического режима (структура блока 2 на рисунке 3.1), приведенная на рисунке 3.3. Верхний уровень выходного сигнала блока 1 определяется естественным ограничением выходного напряжения применяемых опера-

ционных усилителей, а верхний уровень выходного сигнала блока 2 устанавливается равным $|K_I - K_{\text{опт}}|$. Это обусловлено тем, что максимальное значение коэффициента связи K ниже значений K_{UI} или K_U соответствующих текущему значению частоты вращения.

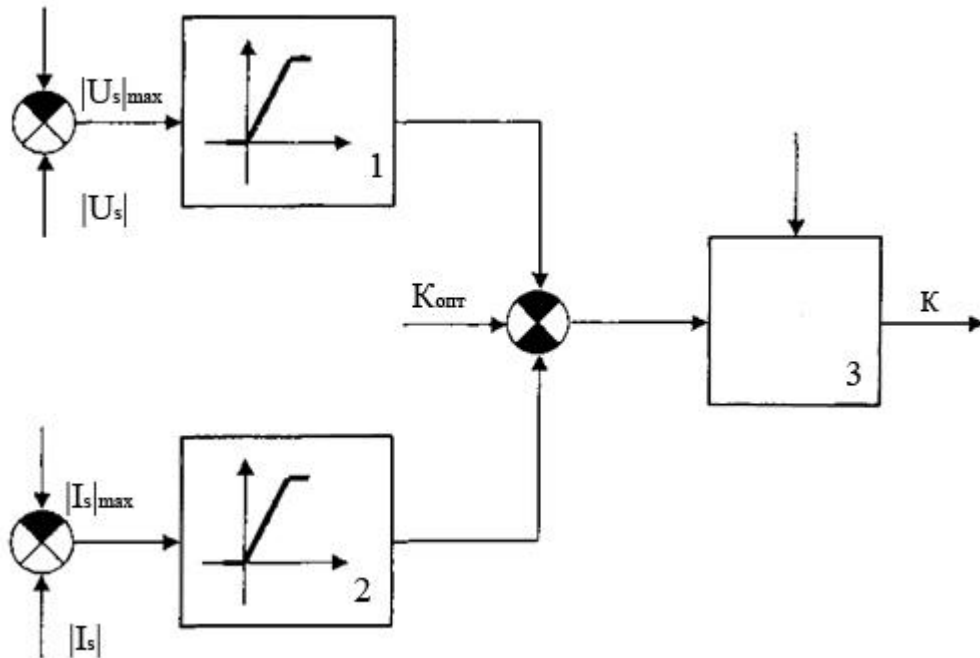


Рисунок 3.3 – Структура цепи автоматической установки оптимального статического режима

Очевидно, что превышение допустимого значения потребляемой мощности не должно приводить к изменению значения коэффициента K . Следовательно, уменьшать потребляемую мощность необходимо за счет снижения развиваемого момента, т.е. за счет уменьшения $|I_s|_{\text{max}}$. На рисунке 3.4 приведена структурная схема блока формирования заданных значений токов статора (структура блока 1 на рисунке 3.1). Блок 1 – масштабирующий усилитель с коэффициентом передачи, равным $\frac{L_s}{pL_m^2}$.

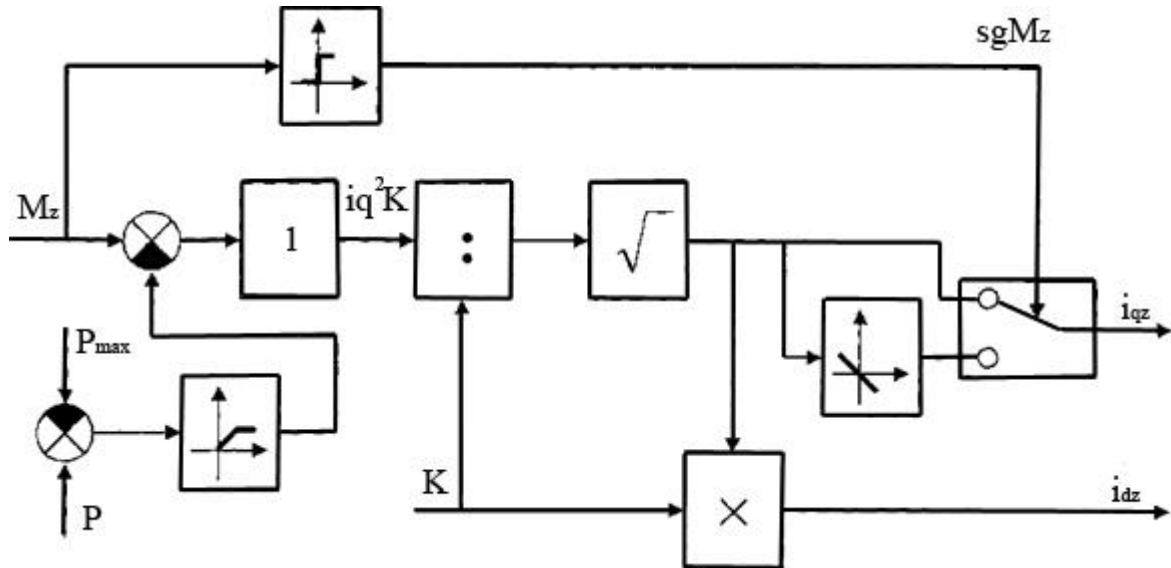


Рисунок 3.4 – Структурная схема блока формирования заданных значений токов статора

Таким образом, проведена реализация задачи синтеза оптимальных статических режимов работы асинхронной машины с короткозамкнутым ротором и структурная реализация системы управления, выполненные с помощью метода векторно-токовой оптимизации. Данный метод является общим и может быть применен к любому типу электрических машин.

3.2.2 Управление синхронной машиной с электромагнитным возбуждением.

Дифференциальные уравнения синхронной машины с электромагнитным возбуждением, записанные в ортогональной системе координат (d, q) , ось d которой ориентирована по продольной оси ротора, а ось q в опережающем ее на 90° направлении, имеет вид

$$\begin{cases} \frac{d\psi_d}{dt} = -R_s i_d + \omega \psi_q + U_d \\ \frac{d\psi_q}{dt} = -R_s i_q - \omega \psi_d + U_q \\ \frac{d\psi_B}{dt} = -R_B i_B + U_B \end{cases} \quad (3.17)$$

где i_d, i_q, ψ_d, ψ_q – координаты векторов тока и потокосцепления статора;

ψ_B, i_B, U_B – потокосцепления, ток и напряжение обмотки возбуждения соответственно;

R_s, R_B – активные сопротивления обмоток статора и обмотки возбуждения.

Потокоцепление и токи связаны следующими соотношениями

$$\begin{cases} \psi_d = L_{sd}i_d + L_{md}i_B \\ \psi_q = L_{sq}i_q \\ \psi_B = L_Bi_B + L_{md}i_d \end{cases} \quad (3.18)$$

где L_{sd}, L_{sq} – полная собственная индуктивность статора соответственно в продольной и поперечной осях;

L_{md} – взаимная индуктивность обмоток статора и обмотки возбуждения по продольной оси;

L_B – полная собственная индуктивность обмотки возбуждения.

Развиваемый машиной момент M равен

$$M = p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3.19)$$

Рассмотрим работу машины, например, при $i_d = 0$, т.е. при чисто поперечном токе якоря. При этом ток в обмотке возбуждения может быть представлен в виде

$$I_B = K \cdot i_q \quad (3.20)$$

Записав (3.17) для статических режимов работы, нетрудно получить уравнения, выражающие среднее значения компонент вектора напряжения статора (якоря) через средние значения компонент вектора тока статора. Затем, используя эти уравнения и уравнения (3.18), (3.19), (3.20), получаем

$$M = pL_{md} \frac{I_B^2}{K} = pL_{md}K |I_s|^2 \quad (3.21)$$

$$P = \frac{M}{pL_{md}} \left(\frac{R_s}{K} + R_B K \right) \quad (3.22)$$

$$W = \frac{\omega L_{md} |U_s|^2}{\omega^2 \left[L_{md}^2 + \left(\frac{L_{sq}}{K} \right)^2 \right] K + \frac{R_s^2}{K} + 2\omega R_s L_{md}} \quad (3.23)$$

Отсюда, в соответствии с МВТО, получаем величину коэффициента связи, при котором момент максимален

$$K_{\text{опт}} = \pm \sqrt{\frac{R_s}{R_B}} \quad (3.24)$$

$$K_I = \pm \frac{I_{B\text{max}}}{|I_s|_{\text{max}}} \quad (3.25)$$

$$K_{U=} \pm \frac{\sqrt{R_s^2 + \omega^2 L_{sq}^2}}{\omega L_{md}} \quad (3.26)$$

Как и ранее, знак «+» соответствует двигательному режиму работы, а «-» генераторному.

Уравнение для построения предельных механических характеристик привода при различных значениях коэффициента связи нетрудно получить из (3.23)

$$n = -\frac{R_s L_{md} K}{p(L_{sq}^2 + K^2 L_{md}^2)} \pm \sqrt{\frac{L_{md} K |U_s|^2}{p(L_{sq}^2 + K^2 L_{md}^2) M} - \frac{R_s^2 L_{sq}^2}{p^2 (L_{sq}^2 + K^2 L_{md}^2)^2}} \quad (3.27)$$

Используя уравнение (3.27), можно построить кривые предельных механических характеристик привода при $|U_s| = |U_s|_{\max}$ и различном уровне потерь. Наиболее характерное и наглядное расположение этих кривых показано на рисунке 3.5. Кривая 1 представляет собой предельную механическую характеристику привода при $K = K_{\text{опт}}$. Она ограничивает зону возможной работы машины в оптимальном режиме. Величина M_1 определяется из (3.21) при оптимальном значении коэффициента связи и предельном значении тока статора или тока в обмотке возбуждения в зависимости от того, какой из этих токов при возрастании момента первым достигает своего предельного значения. Вообще говоря, это определяется только соотношением значений коэффициентов связи $K_{\text{опт}}$ и K_I : при $K_{\text{опт}} > K_I$ раньше наступает ограничение по току возбуждения, а при $K_{\text{опт}} < K_I$ – по току статора. В дальнейшем будем рассматривать только случай с $K_{\text{опт}} > K_I$, так как данный случай является наиболее типичным.

Кривая 2 соответствует предельной механической характеристике привода при $K = K_I$, а кривая 3 – при $K = K_U$, т.е. она ограничивает зону работы машины с максимально возможной мощностью. Кривая 4 представляет собой предельную механическую характеристику привода при одновременном ограничении $|U_s|$ на уровне $|U_s|_{\max}$ и I_B на уровне $I_{B\max}$, т.е. она построена при $K = K_{UI}$. Значения K_{UI} определяются из уравнения (3.21). Поэтому очевидно, что кривая 4 должна проходить через точку (n_1, M_1) с $K = K_{\text{опт}}$, $|U_s| = |U_s|_{\max}$, $I_B = I_{B\max}$, $|I_s| < |I_s|_{\max}$ и точку (n_3, M_{\max}) с $K = K_I$, $|U_s| = |U_s|_{\max}$, $I_B = I_{B\max}$, $|I_s| = |I_s|_{\max}$ (точка максимума мощности разви-

ваемой машиной), а также должна иметь точку касания с кривой 3 (точка «а»). Таким образом, предельная по мощности механическая характеристика привода, как и в случае с асинхронной машиной, также состоит из двух участков, а в отношении величины коэффициента связи можно выделить три зоны работы:

первая зона, ограниченная осями n , M , максимальной скоростью n_{\max} , кривой 1 и моментом M_1 . Величина M_1 определяется при $K = K_{\text{опт}}$ и предельном значении тока в обмотке возбуждения, т.е. при $I_B = I_{B\max}$. Эта зона, в которой при ограничениях $|U_s| = |U_{s\max}|$ и $I_B = I_{B\max}$, достижение условия минимума потерь возможно. Значение коэффициента связи здесь должно быть постоянным и равным $K_{\text{опт}}$;

вторая зона, ограниченная кривой 4 и вертикальными линиями, соответствующими максимальным значениям моментов в режиме минимума потерь M_1 ;

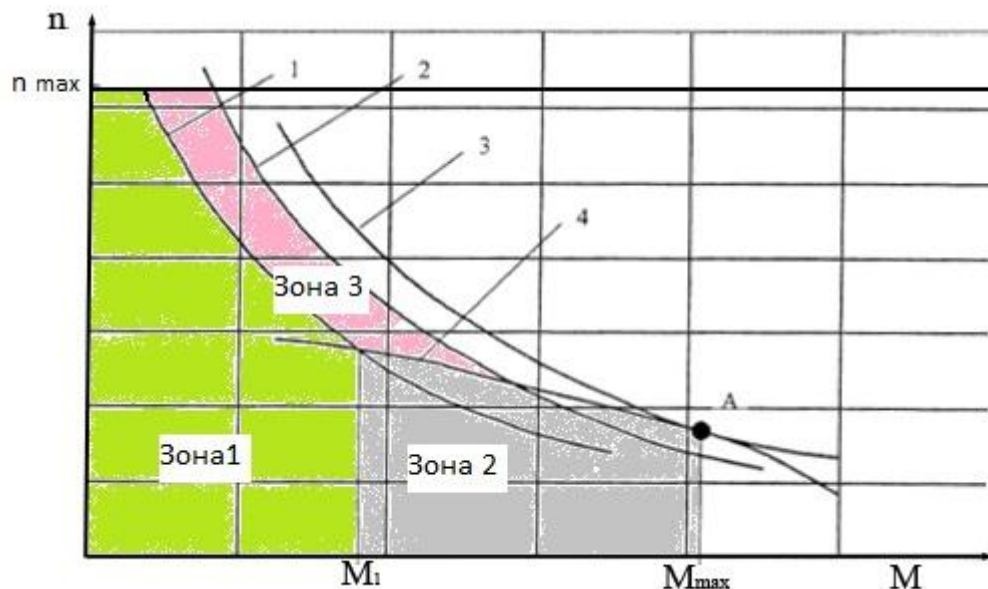


Рисунок 3.5 – Характерное расположение границ зон работы синхронной машины

третья зона, ограниченная кривыми 1, 3, 4 и максимальной скоростью n_{\max} . Здесь с увеличением момента, K должен варьироваться от $K = K_{\text{опт}}$ до $K = K_U$ в функции ограничения $|U_s|$ на уровне $|U_{s\max}|$.

Нетрудно видеть, что для выполнения этих требований, вполне подходят структурные схемы блока формирования статического режима и блока формирования заданных значений токов, изображенные на рисунке 3.3 и рисунке 3.4, соответственно.

3.2.3 Управление машиной постоянного тока с независимым возбуждением.

Дифференциальные уравнения машины постоянного тока с независимым возбуждением (ДНВ) имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = -\frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} I_{\text{я}} - \omega \frac{L_m}{L_{\text{я}}} I_{\text{в}} + \frac{U_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} \\ \frac{dI_{\text{в}}}{dt} = -\frac{R_{\text{в}}}{L_{\text{в}}} I_{\text{в}} + \frac{U_{\text{в}}}{L_{\text{в}}} \end{cases} \quad (3.28)$$

где $I_{\text{я}}$, $U_{\text{я}}$ и $I_{\text{в}}$, $U_{\text{в}}$ – соответственно ток и напряжение питания якорной обмотки и обмотки возбуждения;

$R_{\text{я}}$, $R_{\text{в}}$ – активные сопротивления якорной цепи и цепи обмотки возбуждения соответственно;

$L_{\text{я}}$, $L_{\text{в}}$ – индуктивности рассеяния якорной цепи и обмотки возбуждения соответственно;

L_m – взаимная индуктивность обмотки якоря и обмотки возбуждения.

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем, равен

$$M = pL_m I_{\text{я}} I_{\text{в}} \quad (3.29)$$

Как и ранее представим ток возбуждения в виде

$$I_{\text{в}} = K \cdot I_{\text{я}} \quad (3.30)$$

Из уравнений (3.28), (3.29) и (3.30) можно получить, что в статических режимах работы электромагнитный момент M , потери P в меди машины и мощность W , развиваемая машиной, равны

$$M = pL_m \frac{I_{\text{в}}^2}{K} = pL_m K \cdot I_{\text{я}}^2 \quad (3.31)$$

$$P = \frac{M}{pL_m} \left(\frac{R_{\text{я}}}{K} + K \cdot R_{\text{в}} \right) \quad (3.32)$$

$$W = \frac{U_{\text{я}}^2}{\omega L_m K + 2R_{\text{я}} + \frac{R_{\text{я}}^2}{\omega L_m K}} \quad (3.33)$$

Отсюда, в соответствии с МВТО, получаем (как и в случае с асинхронной машиной) значение коэффициента K , при котором момент максимален

$$K_{\text{опт}} = \pm \sqrt{\frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{в}}}} \quad (3.34)$$

$$K_I = \pm \frac{I_{B \max}}{I_{Я \max}} \quad (3.35)$$

$$K_U = \pm \frac{R_{Я}}{\omega L_m} \quad (3.36)$$

Знак «+» в выражениях (3.34), (3.35), (3.36) соответствует двигательному режиму работы, а «-» генераторному.

Как и ранее, для расчета границ механической характеристики привода в функции потерь в меди, определяемых значениями коэффициента связи K , разрешим уравнение (3.33) относительно частоты вращения:

$$n = -\frac{R_{Я}}{pL_m K} \pm \frac{U_{Я}}{\sqrt{pL_m KM}} \quad (3.37)$$

Характерный вид механических характеристик, для различных K , приведены на рисунке 3.6.

Из (3.31) определяется величина момента M_1 при $K = K_{\text{опт}}$ и $I_B = I_{B \max}$. Линия 2 соответствует режиму работы машины с $U_{Я} = U_{Я \max}$ и $I_B = I_{B \max}$ («естественная» механическая характеристика). Значения коэффициента связи $K = K_{\text{UI}}$, для этого режима, определяются также из уравнения (3.31) (т.к. в этом режиме возможно два варианта управления: при ограничении тока и напряжения, то коэффициенты для них будем обозначать K_{UI}^B и $K_{\text{UI}}^Я$ для ограничения тока возбуждения и тока якоря соответственно). При значении $M = M_{\max}$ величина K_{UI}^B достигает величины, соответствующей точке пересечения границ 2 и 3. При этом токи обмоток статора и ротора, имеют максимальные значения. Гипербола 3 соответствует работе машины при $U_{Я \max}$ и $I_{Я} = I_{Я \max}$, т.е. при $K = K_{\text{UI}}^Я$.

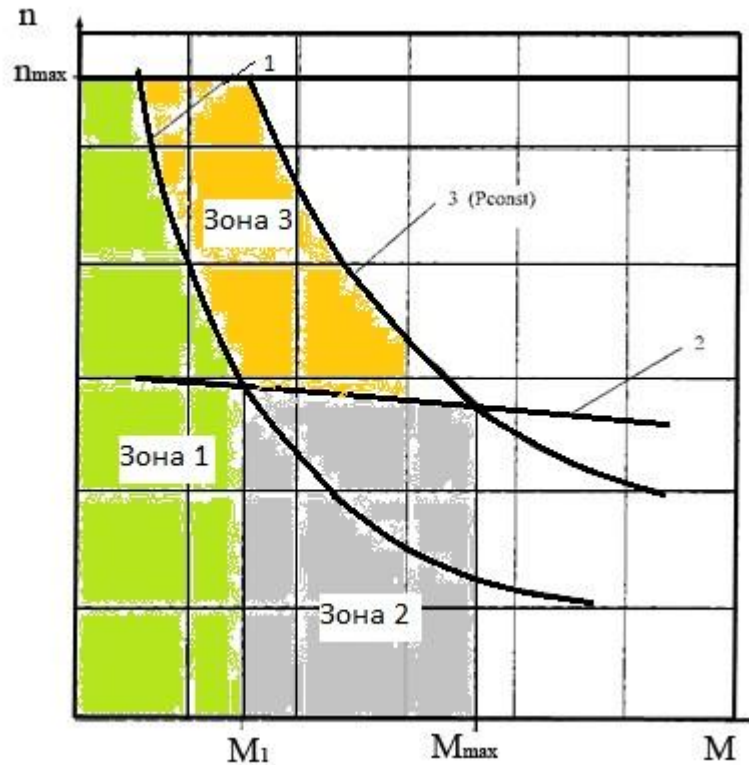


Рисунок 3.6 – Расположение зон механических характеристик двигателя постоянного тока

Значения $K_{UI}^Я$ также можно определить из (3.31) при $I_я = I_{я\ max}$. Используя (3.31), (3.36), (3.37), нетрудно убедиться, что при

$$I_{я\ max} = \frac{U_я}{2R_я} \quad (3.38)$$

мощности, развиваемые машиной при $K = K_U$ и $K = K_{UI}^Я$, равны. Однако, как правило,

$$I_{я\ max} < \frac{U_я}{2R_я}$$

поэтому регулированию при максимальной мощности с ограничением тока якоря соответствует управление с $K = K_{UI}^Я$.

Из изложенного выше, следует, что множество механических характеристик разделяется на три зоны по величине коэффициента K :

первая зона ограничена координатным осями частоты вращения n момента M , максимальной частотой вращения n_{max} , кривой 1 и моментом M_1 . В этой зоне

возможно достижение минимального значения электрических потерь. Для этого должно выполняться условие $K = K_{\text{опт}} = \text{const}$;

вторая зона ограничивается прямой 2 и линиями моментов M_1 , M_{max} . Здесь при токе возбуждения $I_B = I_{B \text{ max}}$ увеличению момента двигателя должно соответствовать изменение коэффициента связи от $K = K_{\text{опт}}$ до $K = K_I$;

третья зона имеет границы: кривая 1, максимальная частота вращения n_{max} , прямая 2 и гипербола 3. Для этой области увеличению момента нагрузки должно соответствовать изменение K от $K = K_{\text{опт}}$ до $K = K_{\text{UI}}^A$ в функции ограничения U_a на уровне $U_{a \text{ max}}$. Таким образом, мы видим, что и для управления машиной постоянного тока можно использовать структуры, изображенные на рисунке 3.1, рисунках 3.3, 3.4 и рисунке 3.7.

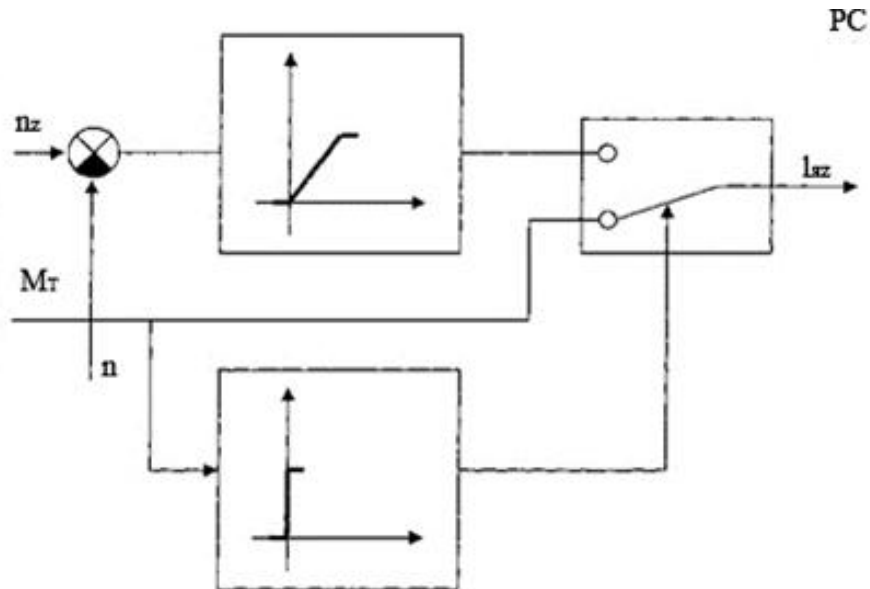


Рисунок 3.7 – Структурная схема формирования заданных токов в электроприводе электромобиля с двигателем постоянного тока независимого возбуждения

Приведенные выше выражения учитывают только потери меди, но суммарные потери мощности ΔP_{Σ} в ДНВ состоят из потерь в меди ΔP_M , потерь в стали ΔP_C , добавочных потерь $\Delta P_{\text{доб}}$, потерь на коллекторе $\Delta P_{\text{код}}$ и механических потерь $\Delta P_{\text{мех}}$

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_M + \Delta P_C + \Delta P_{\text{доб}} + \Delta P_{\text{код}} + \Delta P_{\text{мех}} \quad (3.39)$$

Составляющие суммарных потерь рассчитываются по известным формулам [8], с учетом которых (3.39), пренебрегая величинами $\Delta P_{\text{доб}}$, $\Delta P_{\text{код}}$ и $\Delta P_{\text{мех}}$ в диапазоне малых скоростей ($0 < \omega < \omega_{\text{гр}}$), можно представить в виде

$$\Delta P_{\Sigma} = R_{\text{я}} I_{\text{я}}^2 + R_{\text{в}} I_{\text{в}}^2 + R_{\text{с}} \omega^{\alpha} \Psi^2 \quad (3.40)$$

где $R_{\text{я}}$, $R_{\text{в}}$ – сопротивления обмотки возбуждения и цепи якоря;

$R_{\text{с}}$ – удельные магнитные потери;

$\alpha = 1,2 \dots 1,5$ - показатель степени.

Из (3.40) следует, что потери определяются управляющими сигналами по току $I_{\text{я}}$, току возбуждения $I_{\text{в}}$, магнитному потоку Ψ .

Из выражений для электромагнитного момента M и ЭДС E двигателя независимого возбуждения

$$M = k \Psi I_{\text{я}} = p L_m I_{\text{я}} I_{\text{в}} \quad (3.41)$$

$$E = k \Psi \omega = p L_m \omega I_{\text{в}} \quad (3.42)$$

и уравнений электрического равновесия якорной цепи имеем:

$$I_{\text{я}} = \frac{1}{R_{\text{я}}} U - \frac{k \omega}{R} \Psi \quad (3.43)$$

$$U = \frac{R_{\text{я}}}{k} \cdot \frac{M}{\Psi} + k \Psi \omega \quad (3.44)$$

Из соотношений (3.43, 3.44) токи $I_{\text{я}}$ и $I_{\text{в}}$ подставим в формулу (3.40) и получаем

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{R_{\text{я}}}{k^2} \cdot \frac{M}{\Psi^2} + \frac{k^2 R_{\text{в}} + k_{\text{с}} (p L_m)^2 \omega^2}{(p L_m)^2} \Psi^2 \quad (3.45)$$

Таким образом, получена зависимость суммарных потерь от магнитного потока Ψ (управляющее воздействие) и двух параметров, определяющих режим работы – момента M и угловой частоты вращения ω .

Приравнивая производную выражения (3.45) по потоку нулю, определим выражение для магнитного потока $\Psi_{\text{опт}}$, при котором потери ΔP_{Σ} будут минимальны:

$$\Phi_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{p L_m M}{k} \sqrt{\frac{R_{\text{я}}}{k^2 R_{\text{в}} + k_{\text{с}} (p L_m)^2 \omega^{\alpha}}}} \quad (3.46)$$

Определив оптимальное значение Ψ_{opt} магнитного потока, из выражения (3.41) можно определить токи в цепи возбуждения I_b и якоря I_a .

Таким образом, предложенный метод векторно-токовой оптимизации, позволяет синтезировать структуры блоков ФСР и ФЗТ, которые обеспечивают возможность формирования режима работы электрической машины по критерию безусловного минимума энергетических потерь с автоматическим переходом к условному минимуму потерь при заданных ограничениях тока и напряжения. Показано, что синтезированные структуры являются универсальными для систем тягового привода, так как удовлетворяют различным типам электрических машин.

Следует отметить, что для применения предложенного метода для управления электрическими машинами с возбуждением от постоянных магнитов и вентильной коммутацией, которые из-за известных достоинств получили широкое распространение в силовых приводах ЭМБ и АКЭУ, необходимо учитывать дискретность процессов коммутации силовых вентилях и некоторые другие аспекты их работы. В следующем разделе рассмотрены особенности математического моделирования электрических машин с магнитоэлектрическим возбуждением.

3.2.4 Математическое моделирование вентильных электромеханических преобразователей с магнитоэлектрическим возбуждением

В главе 1 данной работы показано, что электромеханические преобразователи (ЭМП) с возбуждением от постоянных магнитов нашли наиболее широкое распространение в приводах ЭМБ и АКЭУ. Бесщеточная конструкция таких ЭМП обеспечивает более эффективную передачу энергии на колесо и повышенный ресурс. Кроме того, они практически не требуют технического обслуживания. Особенностью ЭМП с возбуждением от постоянных магнитов является необходимость реализации сложных алгоритмов управления, обеспечивающих эффективное использование электромеханического преобразователя в двигательном и генераторном режимах работы.

По своей сути ЭМП с магнитоэлектрическим возбуждением являются динамическими системами с переменной структурой. При упрощающих допущениях они могут рассматриваться как системы с периодически изменяющимися параметрами при установившейся частоте вращения и мгновенном переключении вентилей силового преобразователя, работающего в тандеме с электрической машиной. В этом случае модель ЭМП с постоянными магнитами достаточно просто описывается на основе теории сосредоточенных цепей с периодически изменяющимися параметрами.

При анализе динамических режимов работы вентильных ЭМП с учетом коммутационных процессов вышеуказанный подход к математическому моделированию не является рациональным, так как в этом случае не учитываются отдельные составляющие ЭДС и моментов. Кроме того в системе с дискретным изменением параметров возникают сложности математического порядка при получении уравнений, описывающих эту систему.

Более рациональным следует считать при моделировании вентильных ЭМП вариационный принцип. Вывод уравнений электрического и механического равновесия основывается на положениях принципа Гамильтона и уравнениях Эйлера-Лагранжа.

Получение уравнения движения ЭМП с постоянными магнитами заключается в определении вариации выражения

$$\int_{t_1}^{t_2} \left(\sum_{k=1}^{\bar{n}} \left(\frac{\partial W'}{\partial x_k} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W'}{\partial \dot{x}_k} \right) + Q_k - \frac{\partial F_R}{\partial x_k} \right) \delta x_k \right) dt = 0, \quad (3.48)$$

где W' - обобщенная кинетическая коэнергия электромеханической системы;

x_k - механические координаты; \dot{x}_k - электрические скорости;

Q_k - внешние силы, действующие на систему; F_R - диссипативная функция Рэлея, учитывающая тепловые потери в системе.

Для электромеханической системы с позиционно-зависимым управлением (вентильный двигатель - датчик положения ротора - силовой преобразователь)

необходимо добавить уравнения связи между механическими координатами и электрическими скоростями, которые являются дополнительными условиями функционирования системы. Механические координаты в нашем случае – это угловые координаты фаз обмотки якоря ЭМП, а электрические скорости – соответственно токи.

Запишем уравнения вентильного ЭМП в классической форме в общем виде, полагая наличие обмоток на статоре и роторе. Для этого случая кинетическая энергия

$$W = W' = \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} L_a i_a^2 + M_{af} i_a i_f + \frac{1}{2} L_f i_f^2, \quad (3.49)$$

а диссипативная функция

$$F_R = \frac{1}{2} \eta_{r1} \theta_1^2 + \frac{1}{2} \eta_{r2} \theta_2^2 + \frac{1}{2} R_a i_a^2 + \frac{1}{2} R_f i_f^2, \quad (3.50)$$

здесь обобщенные скорости i_a , i_f , $\dot{\theta}_1$, $\dot{\theta}_2$ – токи контуров якоря и индуктора, частоты вращения соответственно.

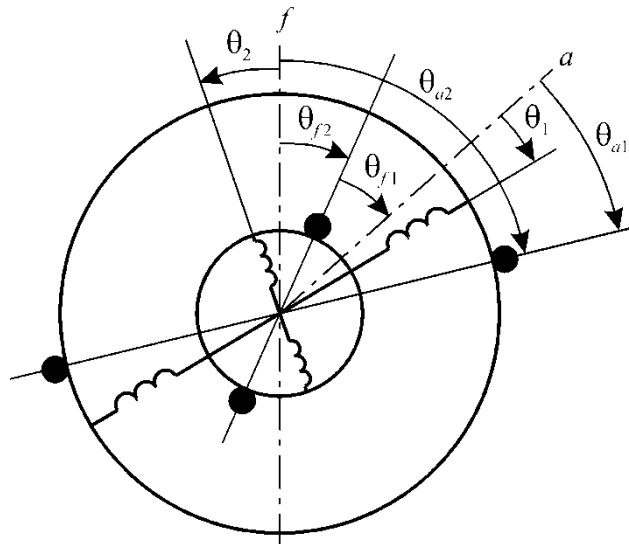


Рисунок 3.8 – Обобщенная электрическая машина с взаимно колеблющимися обмотками

Моделью вентильного ЭМП в такой постановке задачи является обобщенная электрическая машина с колеблющимися обмотками (рис.3.8).

Полная система уравнений с учетом (3.48-3.50) запишется следующим обра-

30М

$$\begin{aligned}
& L_a \frac{di_a}{dt} + M_{af} \frac{di_f}{dt} + \dot{\theta}_{a2} (i_f \frac{\partial M_{af}}{\partial \theta_{a2}} + i_a \frac{\partial L_a}{\partial \theta_{a2}}) + \dot{\theta}_{a1} (i_f \frac{\partial M_{af}}{\partial \theta_{a1}} + i_a \frac{\partial L_a}{\partial \theta_{a1}}) + \\
& + R_a i_a = U_a - (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{a2}) (\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L_a}{\partial \theta_{a2}} i_a + \frac{\partial M_{af}}{\partial \theta_{a2}} i_f) - (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{a1}) (\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L_a}{\partial \theta_{a1}} i_a + \\
& + \frac{\partial M_{af}}{\partial \theta_{a1}} i_f); \\
& L_f \frac{di_f}{dt} + M_{fa} \frac{di_a}{dt} + i_a (\dot{\theta}_{f2} \frac{\partial M_{fa}}{\partial \theta_{f2}} + \dot{\theta}_{f1} \frac{\partial M_{fa}}{\partial \theta_{f1}}) + i_f (\frac{\dot{\theta}_{f1} \partial L_f}{\partial \theta_{f1}} + \frac{\dot{\theta}_{f2} \partial L_f}{\partial \theta_{f2}}) \\
& + R_f i_f = U_f - (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{f2}) (\frac{1}{2} \frac{\partial L_f}{\partial \theta_{f2}} i_f + \frac{\partial M_{fa}}{\partial \theta_{f2}} i_a i_f) - (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_{f1}) \times \\
& \times (\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L_f}{\partial \theta_{f1}} i_f + \frac{\partial M_{fa}}{\partial \theta_{f1}} i_a); \\
& J_1 \ddot{\theta}_1 + \eta_{\tau 1} \dot{\theta}_1 = M_{\text{сТ1}} + \frac{1}{2} \cdot i_f^2 (\frac{\partial L_f}{\partial \theta_{a1}} + \frac{\partial L_f}{\partial \theta_{f1}}) + \frac{1}{2} \cdot i_a^2 (\frac{\partial L_a}{\partial \theta_{a1}} + \frac{\partial L_a}{\partial \theta_{f1}}) + \\
& + \frac{\partial M_{fa}}{\partial \theta_{a1}} i_f i_a + \frac{\partial M_{af}}{\partial \theta_{f1}} i_a i_f; \\
& J_2 \ddot{\theta}_2 + \eta_{\tau 2} \dot{\theta}_2 = M_{\text{сТ2}} + \frac{1}{2} \cdot i_f^2 (\frac{\partial L_f}{\partial \theta_{a2}} + \frac{\partial L_f}{\partial \theta_{f2}}) + \frac{1}{2} \cdot i_a^2 (\frac{\partial L_a}{\partial \theta_{a2}} + \frac{\partial L_a}{\partial \theta_{f2}}) + \\
& + \frac{\partial M_{fa}}{\partial \theta_{a2}} i_f i_a + \frac{\partial M_{af}}{\partial \theta_{f2}} i_a i_f.
\end{aligned} \tag{3.51}$$

В данной системе первые два уравнения – уравнения электрического равновесия контуров якоря и индуктора, третье и четвертое – уравнения моментов.

Учитывая связь обобщенных координат, равенство моментов, действующих на якорь и индуктор при отсутствии действующей силы по оси с координатой θ_{f1} , получим

$$L_a \frac{di_a}{dt} + M_{af} \frac{di_f}{dt} + R_a i_a + \dot{\theta}_2 \frac{\partial M_{af}}{\partial \theta_{a2}} i_f + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L_a}{\partial \theta_{a2}} i_a (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{a2}) = U_a;$$

$$L_f \frac{di_f}{dt} + M_{fa} \frac{di_a}{dt} + R_f i_f - \dot{\theta}_{f2} \frac{\partial M_{fa}}{\partial \theta_{f2}} i_a = U_f; \quad (3.52)$$

$$\frac{1}{2} \cdot J \ddot{\theta}_2 + \eta_{т2} \dot{\theta}_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial L_a}{\partial \theta_{a2}} i_a^2 + \frac{\partial M_{af}}{\partial \theta_{a2}} i_f i_a - M_{ст2}.$$

Полученная модель позволяет анализировать электромеханические и электромагнитные процессы вентильных ЭМП с различными способами коммутации, при наличии датчика положения ротора либо его отсутствии в двигательном, генераторном и рекуперативном режимах работы, что является актуальным, учитывая практические режимы эксплуатации ЭМП в приводах ЭМБ и АКЭУ.

Следующим этапом является переход от общей системы уравнений вентильного ЭМП к уравнениям ЭМП с магнитоэлектрическим возбуждением. Наличие постоянных магнитов в магнитной системе и отсутствие обмотки возбуждения заставляет учитывать ряд особенностей, среди которых следует особо выделить следующие:

- математическая модель состоит из двух уравнений: электрического равновесия для контура якоря и механического равновесия;
- решение этой системы уравнений имеет различия в зависимости от распределения индукции в воздушном зазоре (трапеция или синусоида);
- магнитодвижущая сила (МДС) постоянного магнита, а следовательно и поток возбуждения зависят от интенсивности и характера магнитного поля реакции якоря.

В дополнении следует отметить, что для данного типа ЭМП предпочтительным является трапецеидальное распределение магнитной индукции в зазоре, что позволяет уменьшить уровень пульсаций тока якоря и момента в двигательном режиме и снизить пульсации выпрямленного напряжения в генераторном.

При описании вентильного ЭМП с возбуждением от ПМ введем следующие допущения:

- якорная обмотка симметричная;
- насыщение магнитной системы не учитывается;

- положение рабочей точки на кривой возврата ПМ не зависит от режима работы ЭМП и определяется эквивалентной МДС возбуждения;
- распределение магнитного поля в зазоре трапецеидальное;
- на роторе отсутствуют демпферные обмотки;
- коммутация вентилях силового преобразователя мгновенная.

На рис.3.9 приведена электрическая схема ЭМП с возбуждением от ПМ.

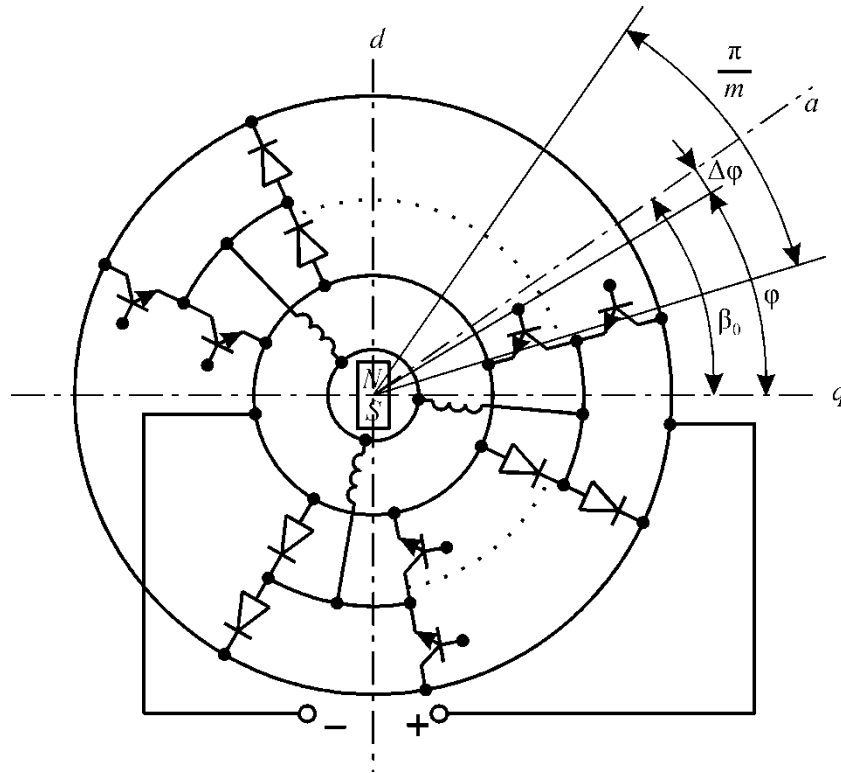


Рисунок 3.9– Электрическая схема ЭМП с возбуждением от ПМ.

Здесь параметры реального m -фазного ЭМП приведены к эквивалентной обмотке якоря и оси ПМ. Необходимо найти закон изменения эквивалентных параметров на интервалах коммутации и межкоммутационном интервале.

Уравнения (3.52) для данной электрической схемы запишем в виде

$$U_a = (L_{a=} + L_{a\sim} \cos 2\varphi) \frac{di_a}{dt} + R_a(\omega t) i_a + \dot{\theta}_2 \frac{\partial}{\partial \varphi} (-L_{a\sim} \cos 2\varphi) i_a +$$

$$+ \dot{\theta}_2 I_M M_{aM\sim} \cos \varphi;$$

$$L_{a=} = 2 \cdot (L_d + L_q) \cos 2(\pi / 2m);$$

$$L_{a\sim} = 2 \cdot (L_d - L_q) \cos 2(\pi / 2m).$$

(3.53)

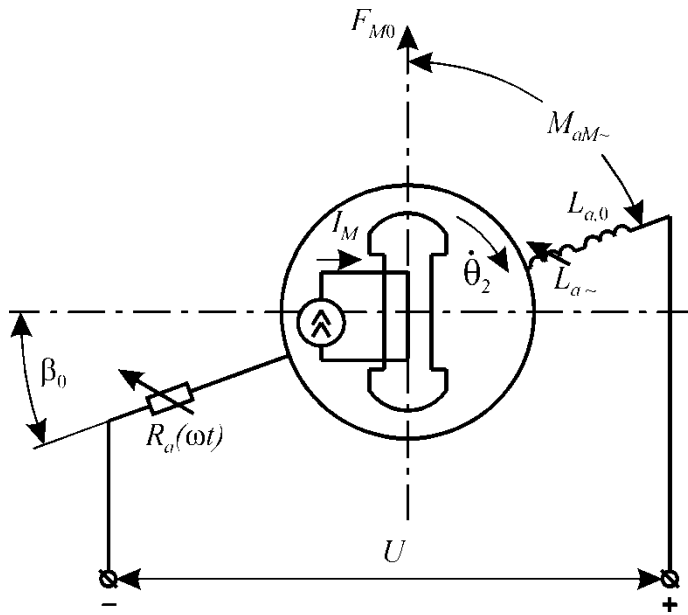


Рисунок 3.10 – Схема ЭМП с ПМ в осях a,d

После преобразования

$$U_{a\Sigma} = (L_{a=} + L_{a\sim} \cos 2\varphi) \frac{di_a}{dt} + R_a(\omega t) i_a + \dot{\theta}_2 \frac{\partial}{\partial \varphi} (-L_{a\sim} \cos 2\varphi) i_a. \tag{3.54}$$

Зависимость активного сопротивления цепи якоря от углового положения ротора показана на рис.3.11, а его значение определяется по уравнению

$$R_a(\omega t) = R_{a,0} + \sum_{k=1}^{\infty} (\dot{R}_{a,k} e^{-jk2m\omega t} + R_{a,k}^* e^{jk2m\omega t}), \tag{3.55}$$

где $R_{a,0}$ - среднее значение сопротивления цепи якоря,

$R_{a,k}$ - k -ые гармонические данного сопротивления.

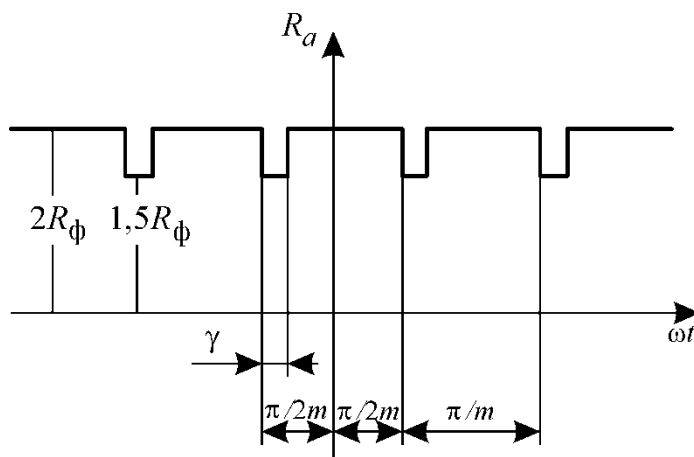


Рисунок 3.11– Зависимость эквивалентного активного сопротивления

$$R_{a,0} = \frac{m}{\pi} \left(\int_{-\frac{\pi}{2m}}^{-\frac{\pi}{2m}+\gamma} 1,5R_{\phi} d\omega t + \int_{-\frac{\pi}{2m}+\gamma}^{\frac{\pi}{2m}} 2R_{\phi} d\omega t \right). \quad (3.56)$$

Наибольший вклад в итоговый результат решения системы уравнений (3.53) вносит постоянная составляющая параметров данной системы. Постоянная составляющая тока якоря ЭМП с ПМ в предположении мгновенной коммутации при синусоидальном распределении поля в зазоре

$$I_a^0 = \frac{U_a - I_M \omega M_M \frac{2m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \cos \beta_0}{R_a - \omega(L_q - L_d) \frac{4m}{\pi} \cos^2 \frac{2\pi}{m} \sin \frac{\pi}{m} \sin 2\beta_0}, \quad (3.57)$$

при трапецеидальном распределении

$$I_{a,\Sigma n}^0 = \frac{1}{R_a} \left(U_a - \frac{32m\omega I_M M_M}{\pi^2 (v_1 - v_0)} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^3} \sin(2n+1) \frac{v_1 + v_0}{4} \times \right. \\ \left. \times \sin(2n+1) \frac{v_1 - v_0}{4} \sin(2n+1) \frac{\pi}{m} \cos(2n+1)\beta_0 \right). \quad (3.58)$$

В выражениях (3.57, 3.58) в числителе применяется символ « M » для обозначения параметров магнитоэлектрического индуктора. В случае трапецеидального распределения индукции в зазоре в формулу тока якоря входят высшие пространственные гармонические, учитывающие отклонение формы поля от синусоиды. Необходимо отметить, что уравнения (3.57, 3.58) качественно адекватно описывают работу ЭМП с ПМ. При желании получить более точные выражения для тока якоря приходится решать определители высшего ранга в системе алгебраических уравнений.

3.2.5 Имитационное моделирование ЭМП с постоянными магнитами

В последние годы широкое распространение получила практика моделирования электромеханических преобразователей различного типа с использованием прикладных пакетов. Наиболее совершенным из них является пакет *MATLAB*-

Simulink. Использование современных компьютерных технологий при создании сложной технической системы позволяет разработать модель, адекватную реальной системе и с наименьшими затратами материальных ресурсов реализовать всесторонний анализ и последующий синтез реально функционирующей системы.

При возбуждении ЭМП от постоянных магнитов его уравнения в матричной форме записи и собственных (фазных) осях

$$\mathbf{U}_{abc} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i}_{abc} + \frac{d\mathbf{L}}{dt} \cdot \mathbf{i}_{abc} + \mathbf{L} \cdot \frac{d\mathbf{i}_{abc}}{dt} + \frac{d\mathbf{M}_M}{dt} I_M, \quad (3.59)$$

где матрица активных сопротивлений, матрица взаимных индуктивностей ОЯ и ПМ

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} R_1 & & & \\ & R_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & R_m \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M}_M = M_M \begin{pmatrix} \cos\alpha & & & \\ \cos(\alpha - \frac{2\pi}{m}) & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cos(\alpha - \frac{2\pi(m-1)}{m}) & & & \end{pmatrix}.$$

Уравнение электрического равновесия для произвольной фазы обмотки якоря

$$u_i = \frac{d}{dt}(\psi_i + \psi_{Mi}) + i_i R_i, \quad (3.60)$$

где ψ_i - собственное потокосцепление фазы

$$\psi_i = L_{\sigma} i_i + \sum_{j=1}^m L_{ij} j_j;$$

ψ_{Mi} - производная потокосцепления взаимной индукции i -ой фазы при $I_M = \text{const}$

$$\psi'_{Mi} = -\omega I_M M_M \sin\alpha_i .$$

Если положить период коммутации напряжения $\frac{2\pi}{m}$, работу инвертора можно разбить на число интервалов $2m$ по состоянию проводимости вентилей силового преобразователя. Каждый из интервалов делится еще на два по проводимости обратного диода в плечах инвертора. На рис.3.12 приведены электрические

схемы вентильного ЭМП с разомкнутой обмоткой якоря (классическая многофазная обмотка переменного тока соединенная по схеме «звезда»), отличающиеся состоянием силовых управляемых ключей и обратных диодов.

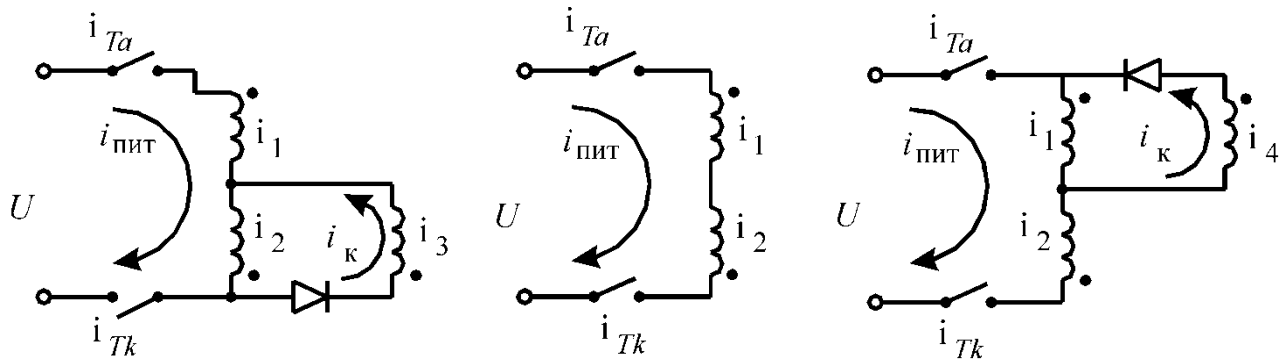


Рисунок 3.12 – Эквивалентные схемы ЭМП с ПМ

Рабочие интервалы:

$$\begin{aligned}
 &\text{для первой схемы – коммутационный} && -\beta_0 + \frac{2k\pi}{m} \leq \omega t \leq \gamma - \beta_0 + \frac{2k\pi}{m}; \\
 &\text{для второй схемы – внекоммутационный} && \gamma - \beta_0 + \frac{2k\pi}{m} \leq \omega t \leq -\beta_0 + \frac{\pi(2k+1)}{m}; \\
 &\text{для третьей схемы – коммутационный} && \gamma - \beta_0 + \frac{\pi(2k+1)}{m} \leq \omega t \leq \frac{2\pi(k+1)}{m} - \beta_0; \\
 &&& -\beta_0 + \frac{\pi(2k+1)}{m} \leq \omega t \leq \gamma - \beta_0 + \frac{\pi(2k+1)}{m},
 \end{aligned}$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Если рассматривать ЭМП с ПМ как квазинепрерывную электромеханическую систему, то для анализа электромеханических процессов в нем можно использовать метод переключающих функций.

На рис.3.13. показаны коммутационные функции, задающие индексы управляемых вентилей и диодов катодной и анодной групп инвертора при спосо-

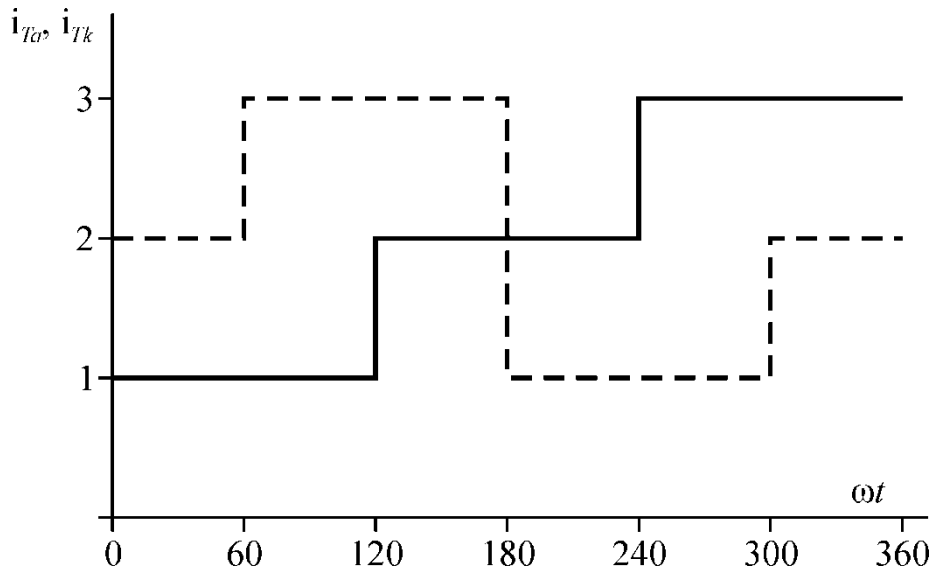
бе коммутации $\frac{2\pi}{m}$. Аналитическая форма записи этих функций выглядит следующим образом:

$$i_{Ta} = 1 + \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0}{2\pi/m}\right) - m \cdot \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0}{2\pi}\right);$$

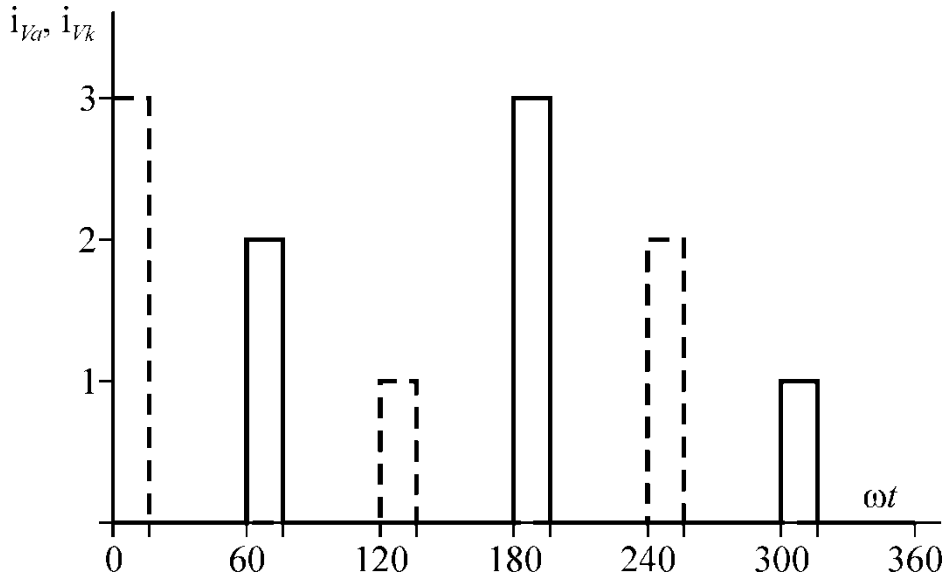
$$i_{Tk} = 1 + \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0 + \pi}{2\pi/m}\right) - m \cdot \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0 + \pi}{2\pi}\right); \quad (3.61)$$

$$i_{Va} = \left(1 + \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0 - \frac{4\pi}{m}}{2\pi/m}\right) - m \cdot \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0 - \frac{4\pi}{m}}{2\pi}\right)\right) \left(1 - \left|\sin \frac{\pi}{2}(\hat{n} + 1)\right|\right) \times (1 - \hat{F}_k);$$

$$i_{Vk} = \left(1 + \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0 - \frac{2\pi}{m}}{2\pi/m}\right) - m \cdot \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0 - \frac{2\pi}{m}}{2\pi}\right)\right) \left|\sin \frac{\pi}{2}(\hat{n} + 1)\right| (1 - \hat{F}_k).$$



a)



б)

Рисунок 3.13 – Диаграммы переключающих функций, определяющих индексы управляемых вентилях (*a*) и диодов (*b*):

———— для анодной группы; - - - - для катодной группы

Графики приведены для случая $m=3$, $\gamma = \frac{\pi}{12}$, $\beta_0 = 0$.

При построении выражений (3.61) использованы знаки модуля функции $|f(x)|$, знака функции $sign(f(x))$, целой части числа $\text{int}(x)$.

В выражениях (3.61) целочисленный аргумент \hat{n} коммутационной функции для m -фазной обмотки якоря

$$\hat{n} = \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0}{\frac{\pi}{m}}\right) + \hat{F}_n = \hat{n}' + \hat{F}_n,$$

где \hat{F}_n - дополнительная коммутационная функция, идентифицирующая состояние структуры ЭМП с ПМ.

$$\hat{F}_n = \begin{cases} -1, & \omega t = \frac{\hat{n}' \pi}{m} - \beta_0; \\ 0, & \omega t \neq \frac{\hat{n}' \pi}{m} - \beta_0. \end{cases}$$

Переключающая функция с коммутационного интервала на внекоммутационный интервал

$$\widehat{F}_K = \begin{cases} 0, & \text{при } \omega t \leq \gamma + \frac{\widehat{n}\pi}{m} \wedge i_K \neq 0 (\wedge i_{2\Delta} \neq i_{3\Delta}); \\ 1, & \text{при } \gamma + \frac{\widehat{n}\pi}{m} \leq \omega t \leq \frac{(\widehat{n}+1)\pi}{m} \wedge i_K = 0 (\wedge i_{2\Delta} = i_{3\Delta}). \end{cases}$$

Коммутационные функции, определяющие индексы секций m -фазной раз-

зомкнутой обмотки якоря при $\frac{2\pi}{m}$ способе управления

$$i_1 = \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0}{2\pi/m}\right) - m \cdot \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0}{2\pi}\right) + 1;$$

$$i_2 = \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0 - \pi}{2\pi/m}\right) - m \cdot \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0 - \pi}{2\pi}\right) + 1;$$

$$i_3 = \left(\text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0 - \frac{2\pi}{m}}{2\pi/m}\right) - m \cdot \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0 - \frac{2\pi}{m}}{2\pi}\right) + 1\right) \cdot \left|\sin \frac{\pi}{2}(\widehat{n} + 1)\right| \cdot (1 - \widehat{F}_K);$$

$$i_4 = \left(\text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0 - \frac{(m+1)\pi}{m}}{2\pi/m}\right) - m \cdot \text{int}\left(\frac{\omega t + \beta_0 - \frac{(m+1)\pi}{m}}{2\pi}\right) + 1\right) \times \\ (1 - \left|\sin \frac{\pi}{2}(\widehat{n} + 1)\right|)(1 - \widehat{F}_K).$$

При произвольном положении оси постоянных магнитов, например при исследовании пуска, в коммутационные функции необходимо вводить различные начальные фазы.

Напряжение i -ой фазы разомкнутой обмотки якоря при равенстве полных сопротивлений секций

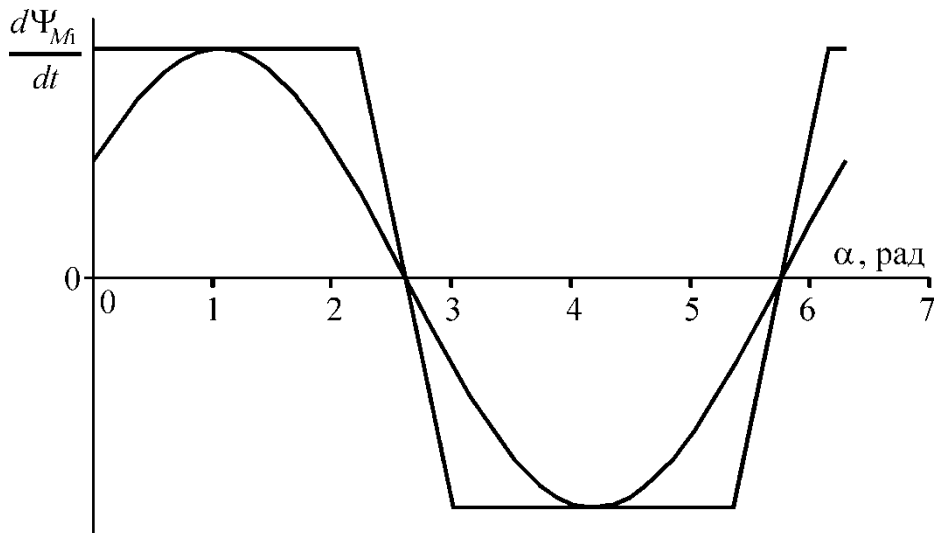
$$U_i = \begin{cases} \frac{2U}{3}, i = i_1 \wedge \widehat{F}_K = 0 \wedge i_4 = 0; \\ \frac{U}{2}, i = i_1 \wedge \widehat{F}_K = 1; \\ \frac{U}{3}, i = i_4 \vee (i = i_1 \wedge \widehat{F}_K = 0 \wedge i_4 \neq 0); \\ -\frac{U}{3}, (i = i_2 \wedge \widehat{F}_K = 0 \wedge i_4 = 0) \vee i = i_3; \\ -\frac{U}{2}, i = i_2 \wedge \widehat{F}_K = 1; \\ -\frac{2U}{3}, i = i_2 \wedge \widehat{F}_K = 0 \wedge i_4 \neq 0; \\ 0, i \neq i_1 \wedge i \neq i_2 \wedge i \neq i_3 \wedge i \neq i_4. \end{cases}$$

Собственные и взаимные индуктивности цепей ЭМП с ПМ при трапецидальном распределении поля в зазоре имеют вид, показанный на рис. 3.14 и рассчитываются по выражениям

$$L_{ij} = L_{ji} = bc \cos \frac{2\pi}{m} (j-i) + c\widehat{F}_{TK}(\widehat{n}'_1). \quad (3.62)$$

Производные потокосцеплений и индуктивностей

$$\frac{d\Psi_{Mi}}{dt} = -\omega I_M M_M \widehat{F}_{TK1}(\widehat{n}_2); \quad \frac{dL_{ii}}{dt} = c\widehat{F}'_{TK}(\alpha_i); \quad \frac{dL_{ij}}{dt} = c\widehat{F}'_{TK}(\alpha_{ij}). \quad (3.63)$$



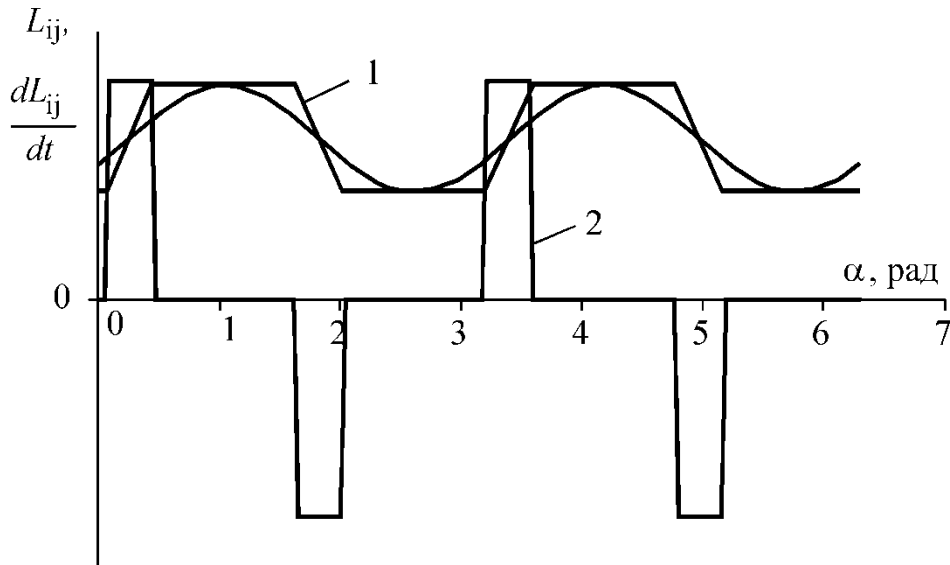


Рисунок 3.14 – Кривые производных потокосцеплений, индуктивностей и взаимных индуктивностей при трапецидальном характере изменения индукции в зазоре:

$$1 - L_{ij}; \quad 2 - \frac{dL_{ij}}{dt}$$

3.2.3 Численное моделирование электромагнитных процессов ЭМП с ПМ в осях dq .

Как было показано в предыдущем параграфе напряжения фаз обмотки якоря ЭМП с ПМ при анализе квазиустановившихся режимов аппроксимируются коммутационными функциями. Момент включения управляемых вентилей, зависящий от импульса, поступающего с датчика положения ротора, входит в выражение аргумента этих функций и может регулироваться. Уравнения в собственных осях, записанные ранее, содержат периодические коэффициенты, для исключения которых проведем координатные преобразования. Отметим, что данное преобразование актуально только для ЭМП с синусоидальным распределением индукции в зазоре.

Уравнения равновесия напряжений ЭМП с ПМ для m -фазной обмотки якоря в осях dq , жестко связанных с ротором, имеет вид

$$\begin{aligned}
U_d &= Ri_d + \frac{m}{2} L_d \frac{di_d}{dt} - \frac{m}{2} \omega L_q i_q; \\
U_q &= Ri_q + \frac{m}{2} L_q \frac{di_q}{dt} - \frac{m}{2} \omega L_d i_d + \omega M_M I_M.
\end{aligned} \tag{3.64}$$

Переход от уравнений в фазных координатах к уравнениям в осях dq осуществляется посредством матрицы преобразований \mathbf{A} .

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}_{abc} &= \mathbf{R} \cdot \mathbf{i}_{abc} + \frac{d\mathbf{L}}{dt} \cdot \mathbf{i}_{abc} + \mathbf{L} \cdot \frac{d\mathbf{i}_{abc}}{dt} + \frac{d\mathbf{M}_M}{dt} I_M; \\
\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{U}_{abc} &= \mathbf{U}_{dq} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{i}_{dq} + \mathbf{A}^{-1} \cdot \frac{d\mathbf{L}}{dt} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{i}_{dq} + \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{A} \cdot \frac{d\mathbf{i}_{dq}}{dt} + \\
&+ \mathbf{A}^{-1} \cdot \frac{d\mathbf{M}_M}{dt} I_M + \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{L} \cdot \frac{d\mathbf{A}}{dt} \cdot \mathbf{i}_{dq}.
\end{aligned}$$

Для обмотки якоря с числом фаз m напряжения в осях dq находятся следующим образом

$$\begin{aligned}
U_d &= \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m U_i \cos \alpha_i; \\
U_q &= -\frac{2}{m} \sum_{i=1}^m U_i \sin \alpha_i.
\end{aligned}$$

Так как период функционирования ЭМП с ПМ согласно методу переключающих функций делится на коммутационный и межкоммутационный интервалы, запишем уравнения напряжений на обоих интервалах для разомкнутой обмотки якоря.

Коммутационный интервал

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} U_d \\ U_q \end{pmatrix} &= \mathbf{A}^{-1} \mathbf{U}_{abc} = \frac{2}{3} U_{\text{пит}} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\alpha - \frac{\pi}{3} \hat{n}) \\ -\sin(\alpha - \frac{\pi}{3} \hat{n}) \end{pmatrix} = \\
&= \frac{2}{3} U_{\text{пит}} \cdot \begin{pmatrix} \sin(\omega t - \frac{\pi}{3} (\hat{n} + 1) - \beta_0) \\ \cos(\omega t - \frac{\pi}{3} (\hat{n} + 1) - \beta_0) \end{pmatrix}.
\end{aligned}$$

Межкоммутационный интервал

$$\begin{pmatrix} U_d \\ U_q \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{3} U_{\text{пит}} \cdot \begin{pmatrix} \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}(2\hat{n}+1) - \beta_0) \\ \cos(\omega t - \frac{\pi}{6}(2\hat{n}+1) - \beta_0) \end{pmatrix}.$$

Для возможности анализа электромеханических процессов систему уравнений (3.64) необходимо дополнить уравнениями механического равновесия и динамики

$$\begin{aligned} M_e &= \frac{m}{2} p \cdot (i_q \cdot \Psi_d - i_d \cdot \Psi_q) \\ M_e &= M_c + J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \quad , \quad (3.65)$$

В заключении следует отметить, что анализ электромагнитных и электромеханических процессов в ЭМП с ПМ можно осуществлять, используя различные модели. Наиболее общей является модель, базирующаяся на интегральных принципах описания электромеханической системы. При этом реальная синхронная машина и силовой преобразователь заменяются эквивалентной коллекторной машиной постоянного тока, щетки которой сдвигаются с линии геометрической нейтрали при изменении нагрузки.

Численное моделирование ЭМП с ПМ с синусоидальным распределением поля рационально реализовать на модели в осях dq , так как в этом случае из уравнений исключаются периодические коэффициенты и нахождение решения существенно упрощается.

Трапецеидальное распределение поля предполагает использование модели в собственных осях обмоток. Такие уравнения являются наиболее удобными для имитационного моделирования ЭМП с ПМ.

В заключение сделаем несколько замечаний.

1. Величину K_{om} необходимо определять, учитывая не только потери в машине, но и в остальных элементах привода – в силовом преобразователе, источнике питания, соединительных проводах и т.д.. Решение этой задачи аналитически-

ми методами практически невозможно без серьезных упрощающих допущений. На практике оптимальные значения K_{opt} можно определить из эмпирических соотношений и результатов численного моделирования.

2. При практической реализации в электроприводах ЭМБ и АКЭУ предлагаемых структур ФСР и ФЗТ возможны их различные модификации, обусловленные тем, что конкретный вид границ расположения зон на плоскости n, M в значительной степени зависит от параметров машины.

3. При построении системы однодвигательного привода ЭМБ или АКЭУ можно также упростить и формирователь заданных токов. Для этого необходимо, чтобы на выходе регулятора скорости (рисунок 3.1) было не заданное значение момента на валу двигателя, а заданное значение соответствующего тока i_{zq} , $|I_s|_z$ или $I_{яz}$, в зависимости от типа используемой в приводе машины.

4. Уравнения для электромагнитного момента и предельных характеристик, полученные с помощью метода векторно-токовой оптимизации, позволяют решить и обратную задачу, то есть задачу определения оптимальных значений параметров схемы замещения электрической машины по заданной циклограмме движения и заданным ограничениями величины тока и напряжения.

3.3 Выбор алгоритмов управления для тягового привода на основе асинхронного двигателя

Традиционное управление силовыми преобразователями осуществляется при избыточности размерности вектора управления. Эта неоднозначность и порождает обилие имеющихся алгоритмов. В связи с этим, задача управления преобразователей состоит в организации рациональной связи переключений в фазах. Для оценки качества регулирования необходимо выбирать критерии, с помощью которых можно было бы осуществить сравнение различных алгоритмов управления с целью нахождения оптимального алгоритма по какому-либо критерию или их совокупности. В качестве таких критериев могут быть взяты следующие: количество переключений в ключевых элементах преобразователя, коммутационные потери и потери в статоре и роторе машины, коэффициент формы, коэффициент нелинейных искажений, коэффициент гармоник, коэффициент амплитуды для реальной кривой фазного тока.

При решении поставленной задачи силовой преобразователь рассматривается в виде совокупности идеализированных ключей K_R, K_S, K_T , которые в соответствии со знаком команд управлений $\text{sign}(U_i)$, $i = R, S, T$ соединяют i выводы фазных обмоток машины с клеммами источника питания. Если напряжение источника питания U_d , то выходные фазные напряжения U_R, U_S, U_T преобразователя, измеренные относительно средней точки источника питания, можно записать в виде

$$U_i = \frac{1}{2} U_d \text{sign}(U_i) \quad (3.66)$$

Тогда обобщенный вектор $U = (U_\alpha, U_\beta)$ выходного напряжения такого преобразователя (мгновенные значения) в неподвижной системе координат (α, β) будет описываться уравнением

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{2} U_d \cdot \begin{bmatrix} e_{R\alpha} & e_{S\alpha} & e_{T\alpha} \\ e_{R\beta} & e_{S\beta} & e_{T\beta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{sign}(U_R) \\ \text{sign}(U_S) \\ \text{sign}(U_T) \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

где $(e_{R\alpha}, e_{R\beta}), (e_{S\alpha}, e_{S\beta}), (e_{T\alpha}, e_{T\beta})$ – проекция направляющих фаз R, T, S машины на координатные оси;

$\sqrt{2/3}$ – коэффициент пропорциональности, определяемый из условия инвариантности мощности при переходе от напряжения реальной трехфазной машины к напряжениям питания эквивалентной двухфазной машины.

В качестве регулируемых переменных (вектора состояния машины) целесообразно выбирать те переменные, информацию о которых можно получить в результате прямых измерений на объекте. Это обычно компоненты векторов тока статора или ротора машины. Дифференциальные уравнения, записанные относительно ошибок регулирования компонент вектора тока статора, используя уравнения обобщенной машины переменного тока, можно представить в виде

$$\sigma \cdot L_s \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta I_\alpha \\ \Delta I_\beta \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \tilde{U}_\alpha \\ \tilde{U}_\beta \end{bmatrix} + \frac{U_d}{\sqrt{6}} \cdot \begin{bmatrix} e_{R\alpha} & e_{S\alpha} & e_{T\alpha} \\ e_{R\beta} & e_{S\beta} & e_{T\beta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{sign}(U_R) \\ \text{sign}(U_S) \\ \text{sign}(U_T) \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

где $\Delta I_\alpha = I_\alpha - I_{Z\alpha}$, $\Delta I_\beta = I_\beta - I_{Z\beta}$ – ошибки регулирования компонент тока статора;

$I_\alpha, I_\beta, I_{Z\alpha}, I_{Z\beta}$ – реальные и заданные значения этих компонент;

U_α, U_β – непрерывные функции состояния магнитной цепи машины и заданного тока.

Задача регулирования сводится к определенной комбинации команд управления, сводящей к нулю величины ΔI_α и ΔI_β (на практике из-за конечной частоты коммутации ключевых элементов преобразователя равенства $\Delta I_\alpha = 0$ и $\Delta I_\beta = 0$ выполняются лишь для средних по времени ошибок регулирования). Решить задачу сведения к нулю ошибок регулирования ΔI_α и ΔI_β , можно за счет организации скользящего режима вдоль некоторого многообразия $S = 0$ в пространстве состояний системы, на котором компоненты вектора управления – фазные напряжения преобразователя U_R, U_S, U_T – претерпевают разрывы. Таким образом, синтез алгоритма управления заключается в выборе желаемого многообразия движения $S = 0$ и обеспечения движения вдоль выбранного многообразия с помощью скользящих режимов. В отношении этого подпространства имеется несколько алгоритмов, которые различаются количеством и видом функций переключения и таблицами

управляющих воздействий для обеспечения движения вдоль выбранного многообразия с помощью скользящих режимов. Ниже рассмотрены некоторые из них.

Алгоритм с минимизацией числа переключений. В соответствии с этим алгоритмом функции переключения на n -ом шаге интегрирования системы дифференциальных уравнений определяются с помощью следующих соотношений

$$s_1^n = \frac{2}{\sqrt{3}} \Delta I_\beta^n, \quad s_2^n = -\Delta I_\alpha^n - \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta I_\beta^n, \quad s_3^n = \Delta I_\alpha^n - \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta I_\beta^n, \quad (3.69)$$

а их знаки определяются выражениями

$$\text{sign} s_{123}^n = 1,$$

если $\text{sign} s_{123}^{n-1} > 1, s^n + \frac{\Delta}{2} > 0$ или $\text{sign} s_{123}^{n-1} < 1, s^n - \frac{\Delta}{2} \geq 0$;

$$\text{sign} s_{123}^n = -1, \quad (3.70)$$

если $\text{sign} s_{123}^{n-1} > 0, s^n + \frac{\Delta}{2} \leq 0$ или $\text{sign} s_{123}^{n-1} < 0, s^n - \frac{\Delta}{2} < 0$.

Знаки управляющих фазных напряжений $\text{sign}(U_R), \text{sign}(U_S), \text{sign}(U_T)$ определяются по таблице 3.1 и зависят от знаков функций управления $\text{sign} s_1, \text{sign} s_2, \text{sign} s_3$ и угла φ между вектором U эквивалентного напряжения статора и осью a неподвижной системы координат (α, β) .

Таблица 3.1 – Определение знаков управляющих напряжений в зависимости от знаков функций управления $\text{sign} s_1, \text{sign} s_2, \text{sign} s_3$ и угла φ между вектором U и осью a неподвижной системы координат (α, β)

Угол φ	$\text{sign} U_r$	$\text{sign} U_s$	$\text{sign} U_t$
$0^\circ < \varphi < 30^\circ$	$\text{sign} S_2$	$-\text{sign} S_1$	-1
$30^\circ < \varphi < 60^\circ$	1	$\text{sign} S_3$	$-\text{sign} S_2$
$60^\circ < \varphi < 90^\circ$	$-\text{sign} S_3$	1	$\text{sign} S_1$
$90^\circ < \varphi < 120^\circ$	$\text{sign} S_2$	$-\text{sign} S_1$	-1
$120^\circ < \varphi < 150^\circ$	-1	$\text{sign} S_3$	$-\text{sign} S_2$
$150^\circ < \varphi < 180^\circ+$	$-\text{sign} S_3$	1	$\text{sign} S_1$
$180^\circ < \varphi < 210^\circ$	$\text{sign} S_2$	$-\text{sign} S_1$	1
$210^\circ < \varphi < 240^\circ$	-1	$\text{sign} S_3$	$-\text{sign} S_2$
$240^\circ < \varphi < 270^\circ$	$-\text{sign} S_3$	-1	$\text{sign} S_1$
$270^\circ < \varphi < 300^\circ$	$\text{sign} S_2$	$-\text{sign} S_1$	1
$300^\circ < \varphi < 330^\circ$	1	$\text{sign} S_3$	$-\text{sign} S_2$
$330^\circ < \varphi < 360^\circ$	$-\text{sign} S_3$	-1	$\text{sign} S_1$

Алгоритм управления с двуполярной векторной модуляцией в неподвижной системе координат. Вид функций переключения зависит от угла γ между потокос-

цеплением ротора Ψ_r и осью α неподвижной системы координат (обычно совпадает с вектором фазного тока фазы R) и имеют вид

$$s_1^1 = \sqrt{3}\Delta I_\alpha \text{ и } s_2^1 = \Delta I_\beta,$$

если $-30^\circ < \gamma < 30^\circ$ и $150^\circ < \gamma < 210^\circ$;

$$s_1^2 = -\frac{\sqrt{3}}{2}\Delta I_\alpha - \frac{3}{2}\Delta I_\beta \text{ и } s_2^2 = \frac{\sqrt{3}}{2}\Delta I_\alpha - \frac{1}{2}\Delta I_\beta,$$

если $30^\circ < \gamma < 90^\circ$ и $210^\circ < \gamma < 270^\circ$;

$$s_1^3 = -\frac{\sqrt{3}}{2}\Delta I_\alpha + \frac{3}{2}\Delta I_\beta \text{ и } s_2^3 = -\frac{\sqrt{3}}{2}\Delta I_\alpha - \frac{1}{2}\Delta I_\beta, \quad (3.71)$$

если $90^\circ < \gamma < 150^\circ$ и $270^\circ < \gamma < 330^\circ$;

а их знаки при использовании этого алгоритма определяются так же, как и в вышеприведенном алгоритме.

Знаки управляющих фазных напряжений $\text{sign}(U_R)$, $\text{sign}(U_S)$, $\text{sign}(U_T)$ определяются по таблице 3.2 и зависят от знаков функций управления $\text{sign } s_1$, $\text{sign } s_2$, и угла γ .

Таблица 3.2 - К определению знаков управляющих напряжений в зависимости от знаков функций управления $\text{sign } s_1$, $\text{sign } s_2$, и угла γ

Угол γ	$\text{sign } U_R$	$\text{sign } U_S$	$\text{sign } U_T$
$-30^\circ < \gamma < 30^\circ$	$-\text{sign } S_1^1$	$-\text{sign } S_2^1$	$\text{sign } S_2^1$
$30^\circ < \gamma < 90^\circ$	$-\text{sign } S_2^2$	$\text{sign } S_2^2$	$-\text{sign } S_1^2$
$90^\circ < \gamma < 150^\circ$	$\text{sign } S_2^3$	$-\text{sign } S_1^3$	$-\text{sign } S_2^3$
$150^\circ < \gamma < 210^\circ$	$-\text{sign } S_1^1$	$-\text{sign } S_2^1$	$\text{sign } S_2^1$
$210^\circ < \gamma < 270^\circ$	$-\text{sign } S_2^2$	$\text{sign } S_2^2$	$-\text{sign } S_1^2$
$270^\circ < \gamma < 330^\circ$	$\text{sign } S_2^3$	$-\text{sign } S_1^3$	$-\text{sign } S_2^3$

Алгоритм управления силовым преобразователем с использованием минимального множества структур. Функции переключения имеют вид

$$\begin{aligned} s_1^n &= -\Delta I_\alpha^n - \frac{3}{2}\Delta I_\beta, \\ s_2 &= \frac{1}{2}\Delta I_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}\Delta I_\beta, \\ s_3 &= \frac{1}{2}\Delta I_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}\Delta I_\beta, \end{aligned} \quad (4.72)$$

а их знаки при использовании этого алгоритма определяются так же, как и в вышеприведенном алгоритме.

Знаки управляющих фазных напряжений $\text{sign}(U_R)$, $\text{sign}(U_S)$, $\text{sign}(U_T)$ определяются по таблице 3.3 и зависят от знаков функций управления $\text{sign } s_1$, $\text{sign } s_2$, $\text{sign } s_3$ и угла φ . Символ «X» означает, что знак может быть любым. Комбинации не вошедшие в таблицу соответствует вектор U^0 и знаки фазных напряжений $\text{sign}(U_i) = +1$ или -1 , где $i = R, S, T$.

Таблица 3.3 – К определению знаков управляющих фазных напряжений в зависимости от знаков функций управления $\text{sign } s_1$, $\text{sign } s_2$, $\text{sign } s_3$ и угла φ

Угол φ	$\text{sign } U_1$	$\text{sign } U_2$	$\text{sign } U_3$	U^1	$\text{sign } U_R$	$\text{sign } U_S$	$\text{sign } U_T$
$0^\circ < \varphi < 60^\circ$	+1	-1	X	U^1	+1	-1	-1
	X	+1	-1	U^2	+1	+1	-1
$60^\circ < \varphi < 120^\circ$	+1	X	-1	U^2	+1	+1	-1
	-1	+1	X	U^3	-1	+1	-1
$120^\circ < \varphi < 180^\circ$	X	+	-1	U^3	-1	+1	-1
	-1	X	+1	U^4	-1	+1	+1
$180^\circ < \varphi < 240^\circ$	-1	+1	X	U^4	-1	+1	+1
	X	-1	+1	U^5	-1	-1	+1
$240^\circ < \varphi < 300^\circ$	-1	X	+1	U^5	-1	-1	+1
	+1	-1	X	U^6	+1	-1	+1
$300^\circ < \varphi < 360^\circ$	X	-1	+1	U^6	+1	-1	+1
	+1	X	-1	U^1	+1	-1	-1

Алгоритм управления с двуполярной векторной модуляцией во вращающейся системе координат. Функции переключения имеют вид

$$s_1^n = I_d^n - I_{zd}^n, s_2^n = I_q^n - I_{zq}^n, \quad (3.73)$$

где I_{zd} , I_{zq} – заданные значения проекции вектора тока статора на оси подвижной системы координат (d, q) ;

I_d , I_q – проекции реального вектора тока статора на оси подвижной системы координат (d, q) , которые определяются выражениями

$$I_d = I_\alpha \cos \gamma + I_\beta \sin \gamma, I_q = -I_\alpha \sin \gamma + I_\beta \cos \gamma, \quad (3.74)$$

где γ – между осью d подвижной системы координат (обычно совпадает с потокоцеплением ротора Ψ_r) и осью α неподвижной системы координат. А их знаки при использовании этого алгоритма определяются так же, как и в вышеприведенном алгоритме.

Знаки управляющих фазных напряжений $\text{sign}(U_R)$, $\text{sign}(U_S)$, $\text{sign}(U_T)$ определяются по таблице 3.4 и зависят от знаков функций управления $\text{sign } s_1$, $\text{sign } s_2$, и угла γ .

Таблица 3.4 – К определению знаков управляющих фазных напряжений в зависимости от знаков функций управления $\text{sign}(U_R)$, $\text{sign}(U_S)$, $\text{sign}(U_T)$ и знаков функций управления $\text{sign } s_1$, $\text{sign } s_2$, и угла γ

Угол γ	$\text{sign } U_R$	$\text{sign } U_S$	$\text{sign } U_T$
$-30^\circ < \gamma < 30^\circ$	$-\text{sign } S_1$	$-\text{sign } S_2$	$\text{sign } S_2$
$30^\circ < \gamma < 90^\circ$	$\text{sign } S_2$	$-\text{sign } S_2$	$\text{sign } S_1$
$90^\circ < \gamma < 150^\circ$	$\text{sign } S_2$	$-\text{sign } S_1$	$-\text{sign } S_2$
$150^\circ < \gamma < 210^\circ$	$\text{sign } S_1$	$\text{sign } S_2$	$-\text{sign } S_2$
$210^\circ < \gamma < 270^\circ$	$-\text{sign } S_2$	$\text{sign } S_2$	$-\text{sign } S_1$
$270^\circ < \gamma < 330^\circ$	$-\text{sign } S_2$	$\text{sign } S_1$	$\text{sign } S_2$

Алгоритм управления с двуполярной векторной модуляцией во вращающейся системе координат. Он основан на том, что, если известно направление вектора U эквивалентного напряжения статора, то для его получения достаточно использовать только три значения вектора выходного напряжения преобразователя, если они образуют минимальную выпуклую линейную оболочку, содержащую вектор U . Поэтому функции переключения имеют такой же вид, что и предыдущего алгоритма, а алгоритм выбора управляющих воздействий сводится к таблице 3.4 с добавлением функции безусловное переключение всех фаз в положение $\text{sign}(U_i) = +1$ или -1 , где $i = R, S, T$ в диапазоне углов $0^\circ < \gamma < 360^\circ$, если $\text{sign } s_2 = +1$.

Для приведённых выше алгоритмов управления, были рассчитаны параметры, характеризующие их эффективность: количество переключений по фазам, коэффициент формы, коэффициент нелинейных искажений, коэффициент гармоник, коэффициент амплитуды для реальной кривой фазного тока и т.д. Исходными параметрами при расчёте асинхронного двигателя являются параметры, определяющие его режим работы (электромагнитный момент M_Z , угловая частота вращения ротора Ω , число пар полюсов p , коэффициент связи K), а также параметры схемы замещения (индуктивность статорной обмотки L_1 , роторной L_2 , взаимная индуктивность статора и ротора L_m , активное сопротивление ротора и статора R_r и

R_s). Расчёт ведётся при заданных напряжении аккумуляторной батареи U_d , ширине «трубки тока» Δ , начальном значении угла γ_n между потокоцеплением ротора Ψ_r и вектором фазного тока фазы R (осью α , рисунок 3.16).

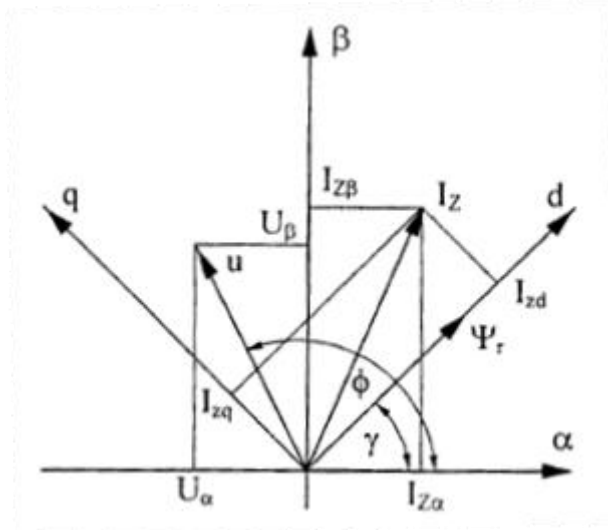


Рисунок 3.16 – Векторная диаграмма токов и напряжений

Примем:

а) параметры схемы замещения:

$$L_1 = 0,060 \cdot \text{мГн}, L_2 = 0,0658 \times 10^{-3} \text{ Гн}, L_m = 0,804 \text{ мГн},$$

$$R_s = 0,0269 \text{ Ом}, R_r = 0,02048 \text{ Ом};$$

б) параметры режима работы:

$$\text{угловая частота вращения ротора } \Omega = 1500 \text{ об/мин},$$

$$\text{электромагнитный момент } M_Z = 50 \text{ н х м},$$

$$\text{число пар полюсов } p = 4,$$

$$\text{коэффициент связи } k = 1;$$

в) условия расчёта и начальные значения токов машины:

$$\text{напряжение аккумуляторной батареи } U_d = 120 \text{ В},$$

трубка тока $\Delta = 50 \text{ А}$, период работы широтного регулятора равен $1/25$ периода вращения потокоцепления ротора;

г) начальные значения токов асинхронного двигателя принимаются равными нулю – $I_\alpha^0 = I_\beta^0 = I_{r\alpha}^0 = I_{r\beta}^0 = 0$.

Порядок расчета был следующим. Вначале определяются исходные величины и положение требуемого вектора тока I_Z в ортогональной системе координат (d,q) , ось d которой направлена по вектору потокосцепления ротора Ψ_r , а ось q в опережающем ее на 90° направлении

$$I_{Zq}^H = \sqrt{\frac{(L_m + L_2)}{pL_m^2 k}} M_Z I_{Zq}^H = k I_{Zq}^H \quad (3.75)$$

Затем определяются начальные значения (т.е. значения при $t = 0$) проекции I_Z на оси неподвижной системы координат (α, β) . Для этого необходимо задать начальное значение угла γ_n между осью d и осью α . Другими словами, задать начальное положение вектора Ψ_r потокосцепления ротора относительно оси α , которая, как правило, совпадает с направлением фазы R асинхронной машины. Следовательно, проекция I_Z на ось α определяет величину фазного тока машины. Величину лучше γ_n задавать такой, чтобы направление I_Z не совпадало с осью β , т.к. в противном случае $I_{Z\alpha} = 0$ и нельзя будет определить $sign \Delta I_\alpha^0$.

Система координат (d,q) вращается вместе с вектором Ψ_r потокосцепления ротора относительно неподвижной системы координат (α, β) с частотой вращения $\omega_\psi = \omega + R_r / (kL_r)$, где $\omega = p \frac{\pi}{30} \Omega$ – угловая частота вращения вала асинхронного двигателя в рад/сек.

Следовательно, частота f изменения первой гармоники электромагнитных переменных машины (тока, напряжения, потокосцепления) зависит от величины Ω и параметра k , т.е. $f = \omega_\psi / (2\pi)$. Далее определяются знаки функций переключения на нулевом шаге, т.е. в момент $t=0$:

а) находится отклонение текущих значений токов от заданных

$$\Delta I_\alpha^0 = I_\alpha^0 - I_{Z\alpha}^0 \text{ и } \Delta I_\beta^0 = I_\beta^0 - I_{Z\beta}^0; \quad (3.76)$$

б) вычисляются начальные значения функций переключения для исследуемого алгоритма

$$s_1^0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \Delta I_\beta^0; s_2^0 = -\Delta I_\alpha^0 - \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta I_\beta^0; s_3^0 = \Delta I_\alpha^0 - \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta I_\beta^0; \quad (3.77)$$

в) рассчитываются величины $sings_1^0$, $sings_2^0$, $sings_3^0$. Величины $I_{Z\alpha}^0$, $I_{Z\beta}^0$, I_α^0 , I_β^0 должны быть такими, чтобы $|s_1^0|$, $|s_2^0|$, $|s_3^0|$ не превышали $0,5\Delta$.

Определяем положение вектора U эквивалентного напряжения статора, что необходимо для правильного выбора сектора коммутации а, следовательно, и начальные значения U_α^0, U_β^0 ;

г) вычисляются проекции вектора U на оси вращающейся системы координат (d,q) по соотношениям

$$\begin{aligned} L_s &= L_m + L_1; \\ L_r &= L_m + L_2; \\ k_s &= L_m/L_s; \\ k_r &= L_m/L_r; \\ \sigma &= 1 - k_s k_r; \\ U_d^0 &= R_s I_{zd}^0 - \sigma L_s [\omega + R_r/(kL_r)] I_{zq}^0; \\ U_q^0 &= \omega L_s I_{zd}^0 + [R_s + (R_r L_s)/L_r] I_{zq}^0; \end{aligned} \quad (3.78)$$

д) после определения U_d^0, U_q^0 находится угол ξ между U и Ψ_r

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{\arctg U_d^0}{|U_d^0|}, U_d > 0; \\ \xi &= \pi - \frac{\arctg U_d^0}{|U_d^0|}, U_d < 0; \\ \xi &= \frac{\pi}{2}, U_d = 0; \end{aligned} \quad (3.79)$$

е) далее ведется расчет начального угла φ^0 между U и осью α , $\varphi^0 = \xi + \gamma_H$. В начальный момент $\gamma_H = \pi/4$, т.к. при $k=1$ вектор тока располагается под углом в 45° к вектору потокосцепления ротора (режим минимума тока статора). Величина γ_H определяет величины $I_{z\alpha}^0, I_{z\beta}^0$ в соответствии с соотношениями матрицы поворота

$$\begin{pmatrix} I_{z\alpha}^0 \\ I_{z\beta}^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_H & -\sin \gamma_H \\ \sin \gamma_H & \cos \gamma_H \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{zd}^0 \\ I_{zq}^0 \end{pmatrix}; \quad (3.80)$$

ж) далее в соответствии с таблицей, связывающей величины и знаки функций переключения, определяется знаки фазных напряжений при $t=0$

$$\begin{aligned} &signs_1^0 \rightarrow sign(U_R^0); \\ &signs_2^0 \rightarrow sign(U_S^0); \end{aligned} \quad (3.81)$$

$$\text{sign}s_3^0 \text{sign}(U_T^0);$$

и) рассчитываются управляющие воздействия, т.е. величины проекций вектора $U = (U_\alpha, U_\beta)$ выходного напряжения силового преобразователя на оси неподвижной системы координат (α, β) при $t=0$

$$\begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{6}} U_d \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{sign}(U_R^0) \\ \text{sign}(U_S^0) \\ \text{sign}(U_T^0) \end{pmatrix}; \quad (3.82)$$

к) потом, производится расчёт начальных значений потокосцепления асинхронного двигателя, что необходимо для интегрирования системы дифференциальных уравнений для потокосцеплений

$$\begin{aligned} \psi_{s\alpha}^0 &= L_s I_\alpha^0 + L_m I_{r\alpha}^0; \\ \psi_{s\beta}^0 &= L_s I_\beta^0 + L_m I_{r\beta}^0; \\ \psi_{r\alpha}^0 &= L_m I_\alpha^0 + L_r I_{r\alpha}^0; \\ \psi_{r\beta}^0 &= L_m I_\beta^0 + L_r I_{r\beta}^0; \end{aligned} \quad (3.83)$$

определив начальные условия для расчета системы дифференциальных уравнений, вычисляем параметры динамического процесса по шагам. На n -ом шаге производится определение величин U_α^n, U_β^n

$$U_\alpha^n = \frac{U_d}{2\sqrt{6}} [2\text{sign}(U_R^{n-1}) - \text{sign}(U_S^{n-1}) - \text{sign}(U_T^{n-1})]; \quad (3.84)$$

$$U_\beta^n = \frac{U_d}{2\sqrt{2}} [\text{sign}(U_S^{n-1}) - \text{sign}(U_T^{n-1})]; \quad (3.85)$$

л) далее решается система дифференциальных уравнений для потокосцепления, где $\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ – потокосцепление статорных обмоток, $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ – потокосцепление роторных обмоток

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}^n}{dt} &= -\frac{R_s}{\sigma L_s} \psi_{s\alpha} + \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_m} \psi_{r\alpha} + U_\alpha^n; \\ \frac{d\psi_{s\beta}^n}{dt} &= -\frac{R_s}{\sigma L_s} \psi_{s\beta} + \frac{R_s L_m}{\sigma L_s L_m} \psi_{r\beta} + U_\beta^n; \\ \frac{d\psi_{r\alpha}^n}{dt} &= -\frac{R_r}{\sigma L_r} \psi_{r\alpha} + \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} \psi_{s\alpha} - \omega \psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\beta}^n}{dt} &= -\frac{R_r}{\sigma L_r} \psi_{r\beta} + \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r} \psi_{s\beta} + \omega \psi_{r\alpha}; \end{aligned} \quad (3.86)$$

м) по $\Psi_{S\alpha}$, $\Psi_{S\beta}$, $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$ находится электромагнитный момент асинхронной машины

$$M^n = \frac{3pR_r}{2\sigma L_s} (\psi_{S\beta}^n \psi_{r\alpha}^n - \psi_{S\alpha}^n \psi_{r\beta}^n); \quad (3.87)$$

н) далее рассчитывается текущие значения токов машины

$$\begin{aligned} I_\alpha^n &= \frac{1}{\sigma L_s} (\psi_{S\alpha}^n - k_r \psi_{r\alpha}^n); \\ I_\beta^n &= \frac{1}{\sigma L_s} (\psi_{S\beta}^n - k_r \psi_{r\beta}^n); \\ I_{r\alpha}^n &= \frac{1}{\sigma L_r} (\psi_{r\alpha}^n - k_s \psi_{S\alpha}^n); \\ I_{r\beta}^n &= \frac{1}{\sigma L_r} (\psi_{r\beta}^n - k_s \psi_{S\beta}^n); \end{aligned} \quad (3.88)$$

п) затем определяются потери меди

$$P^n = R_s \left[(I_\alpha^n)^2 + (I_\beta^n)^2 \right] + R_r \left[(I_{r\alpha}^n)^2 + (I_{r\beta}^n)^2 \right]; \quad (3.89)$$

и производится определение положения I_z на n -ом шаге, т.е. нахождение его проекций на оси неподвижной системы координат (α , β)

$$\begin{aligned} I_{z\alpha}^n &= I_{zd}^n \cos(\gamma^n) - I_{zq}^n \sin(\gamma^n); \\ I_{z\beta}^n &= I_{zd}^n \sin(\gamma^n) + I_{zq}^n \cos(\gamma^n); \end{aligned} \quad (3.90)$$

где $\gamma^n = \omega_\psi n \Delta t + \gamma_H$;

р) далее определяются значения функций переключений на n -ом шаге

$$\begin{aligned} \Delta I_\alpha^n &= I_\alpha^n - I_{z\alpha}^n & \Delta I_\beta^n &= I_\beta^n - I_{z\beta}^n; \\ s_1^n &= \frac{2}{\sqrt{3}} \Delta I_\beta^n; & s_2^n &= -\Delta I_\alpha^n - \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta I_\beta^n; & s_3^n &= \Delta I_\alpha^n - \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta I_\beta^n; \end{aligned} \quad (3.91)$$

с) потом находят знаки функций переключения в соответствии с методом выбора знаков управляющих напряжений. Затем находят значения угла φ между U и осью α (сектор коммутации) $\varphi^n = \omega_\psi t^n + \varphi^0$;

т) по таблице в соответствии с методом выбора знаков переключений определяются значения $\text{sign}(U_R)$, $\text{sign}(U_S)$, $\text{sign}(U_T)$. Весь цикл повторяется на каждом шаге.

По окончании расчёта периода $T=1/f = (2\pi)/\omega_\psi$ находятся средние значения момента на валу. Результирующая величина M сравнивается с заданной в начале

расчета величиной M_z . В случае значительного отличия этих величин производится коррекция входного значения I_{zq} и далее расчет повторяется до схождения. После достижения схождения (с требуемой точностью) производится расчет потерь в стали, коммутационных потерь, суммарных потери в асинхронной машине.

Далее кривые токов раскладываются на гармонические составляющие методом БПФ и рассчитываются коэффициент формы, коэффициент нелинейных искажений, коэффициент гармоник.

Результаты расчётов сведены в таблицу 3.5, где N – количество переключений в фазах, M_z – средний момент за период, P_M – это потери в меди, $P_{ст}$ – это потери в стали, $\Delta i_{\alpha max}$, $\Delta i_{\beta max}$ – это максимальные отклонения токов, $S_1 - S_3$ – это максимальные значения функций переключения, $K_{\phi\alpha}$, $K_{\phi\beta}$ – это коэффициенты формы, $K_{и\alpha}$, $K_{и\beta}$ – это коэффициенты нелинейных искажений, $K_{r\alpha}$, $K_{r\beta}$ – это коэффициенты гармоник, $K_{a\alpha}$, $K_{a\beta}$ – это коэффициенты амплитуды, алгоритм №0 соответствует алгоритму частотно-токового управления, №1 – алгоритму управления с двуполярной векторной модуляцией в неподвижной системе координат, №2 – алгоритму управления с использованием минимального количества структур, №3 – алгоритм управления с двуполярной векторной модуляцией во вращающейся системе координат; №4 – алгоритму управления с однополярной векторной модуляцией во вращающейся системе координат, №5 – алгоритму частотно-токового управления, №6 – алгоритму Me Murrey, №7 – алгоритм двуполярной ШИМ.

Таблица 3.5 – Алгоритмы управления электроприводом

Параметр	Номер алгоритма							
	0	1	2	3	4	5	6	7
N_R	38	82	42	62	41	36	36	50
N_S	36	82	44	60	40	34	36	50
N_T	38	82	47	64	40	28	36	50
M_z	50.09	49.93	49.92	49.95	50.02	49.99	50.09	50.08
P_M	789.1	784.4	781.5	796.5	780.7	788	798.1	812.1

P_{CT}	90.88	90.59	90.58	90.63	90.76	90.7	90.88	90.86
$\Delta i_{\alpha max}$	36.5	31.74	47.07	35.08	34.7	45.97	44.58	53.99
$\Delta i_{\beta max}$	41.65	29.96	39.09	36.56	36.93	42.09	40.27	55.84
S_{1max}	48.09	40.14	47.07	25.06	28.61	45.97	44.58	108.1
S_{2max}	48.28	25.11	37.85	27.75	28.02	48.26	45.83	108.4
S_{3max}	47.85	0	42.68	0	0	37.82	44.5	109.5
$K_{\phi\alpha}$	1.119	1.113	1.117	1.118	1.121	1.116	1.116	1.115
$K_{\phi\beta}$	1.113	1.117	1.112	1.116	1.108	1.112	1.114	1.111
$K_{и\alpha}$	0.9905	0.9937	0.9896	0.9892	0.9906	0.9908	0.9884	0.9946
$K_{и\beta}$	0.9906	0.9936	0.9903	0.9893	0.9912	0.9912	0.9885	0.9946
$K_{r\alpha}$	0.1386	0.113	0.1451	0.1484	0.1376	0.1359	0.154	0.1046
$K_{r\beta}$	0.1367	0.1126	0.1391	0.147	0.1332	0.1342	0.1535	0.1046
$K_{a\alpha}$	1.646	1.594	1.651	1.639	1.654	1.65	1.631	1.523
$K_{a\beta}$	1.671	1.583	1.65	1.685	1.729	1.632	1.671	1.661

Из таблицы 3.5 видно, что алгоритмы управления с двуполярной векторной модуляцией в неподвижной системе координат и двуполярной ШИМ имеют наименьший коэффициент гармоник и коэффициент нелинейных искажений наиболее близкий к единице, т.е. имеют более высокие энергетические характеристики в сравнении с другими, но алгоритм управления с двуполярной векторной модуляцией в неподвижной системе координат реализуется за счёт большего числа переключений. Таким образом, на основе анализа множества алгоритмов можно выбрать наиболее оптимальный алгоритм управления для реализации поставленной задачи.

3.4 Управление асинхронным двигателем. Бездатчиковый привод

Несмотря на бурное развитие технологий, проблема создания высококачественного асинхронного электропривода для целей массового применения в автомобилестроении остается не решенной. Основной преградой на этом пути является

ся сам асинхронный двигатель, представляющий собой достаточно сложный, нелинейный объект управления. Наиболее доступные по цене частотно-регулируемые электроприводы обладают относительно малым диапазоном регулирования по скорости (до 50), построены по разомкнутой схеме, без обратной связи и, как следствие, имеют низкую точность поддержания скорости, зависящую только от жесткости естественной механической характеристики. Высококачественные электроприводы с векторным управлением требуют целого ряда навесных и встроенных измерительных датчиков и устройств обработки измеряемого сигнала, что делает эти приводы предметом уникального использования. Все остальные, промежуточные варианты реализации асинхронных электроприводов заполняют поле компромисса между требованиями точности и стоимости. Тем не менее, к настоящему времени оформились устойчивые тенденции в разработке и создании нового класса асинхронных электроприводов, так называемого бездатчикового асинхронного электропривода, совмещающего в себе основные достоинства частотно-регулируемого привода и привода с векторным управлением. По существу, речь идет о приводе с векторным управлением, в котором все дорогостоящее измерительное оборудование, исключая датчики тока и напряжения, заменено на вычислительные устройства, восстанавливающие необходимые величины (частота вращения вала, положение, магнитный поток и т.д.) по доступным измерениям. В этом направлении активно применяются алгоритмы управления на базе нечеткой логики и нейронных сетей, являющихся основой различных самообучающихся систем. Вершиной развития выступает высококачественный бездатчиковый асинхронный электропривод, по своим потребительским свойствам подобный компьютерному «plug and play» оборудованию. Наличие такого привода позволит потребителю вовсе не заботиться о совместимости двигателя и модуля управления, а также технических характеристиках электропривода, оставляя за ним только обязанность подключения двигателя к модулю управления и питающей сети, а также задания желаемого режима работы. Причем, в роли задатчика режима работы могут выступать не только встроенные или навесные логические устройства, реализующие жесткий алгоритм работы привода, но и всевозможные

компьютерные системы сетей массового обслуживания, домашние компьютеры и т.д.

В подавляющем большинстве случаев электропривод строится по схеме: силовой полупроводниковый преобразователь – асинхронный двигатель. В роли силового преобразователя обычно выступает транзисторный или тиристорный инвертор напряжения, питаемый от источника постоянного напряжения. В свою очередь источник питания может быть автономным (аккумуляторная батарея, топливный элемент, двигатель-генераторная установка и т.д.) или полученный путем выпрямления переменного напряжения сети.

Рассмотрим задачу управления электроприводом на базе асинхронного двигателя (АД) с к.з. ротором и полупроводникового преобразователя частоты в виде инвертора напряжения. Выходной регулируемой координатой является электромагнитный момент. В такой постановке задача управления АД возникла относительно недавно, в основном, в связи с массовым применением АД в качестве исполнительных устройств в различных мехатронных модулях, представляющих собой достаточно сложные механические системы. При этом, естественно возникла проблема декомпозиции движений в замкнутой электромеханической системе, в результате решения которой электродвигателю, как правило, отводилась роль безынерционного источника электромагнитного усилия.

Дифференциальные уравнения обобщенной двухполюсной асинхронной машины в системе координат, вращающейся с некоторой частотой ω_d имеют вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\psi}_s = -R_s i_s - \omega_k \psi_s + u_s \\ \dot{\psi}_r = -R_r i_r - (\omega_k - \omega) \psi_r \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J} (M - M_c) \\ \psi_s = L_s i_s + L_m i_r \\ \psi_r = L_r i_r + L_m i_s \\ M = \frac{m}{2} \psi_r i_s \\ L_s = L_{\sigma s} + L_m; L_r = L_{\sigma r} + L_m \end{array} \right. \quad (3.92)$$

где $\dot{\psi}_s, \dot{\psi}_r, i_s, i_r$ – векторы потокосцеплений и токов статора и ротора соответственно;

u_s – вектор питающего напряжения;

R_s, R_r – сопротивление обмотки статора и приведенное сопротивление обмотки роторной цепи;

L_s, L_r – индуктивность статора и приведенная индуктивность обмотки ротора;

$L_{\sigma s}, L_{\sigma r}$ – индуктивности рассеивания статорной и роторной цепей;

L_m – индуктивность контура намагничивания;

ω_k, ω – аксиальные векторы угловых частот вращения системы координат и вала обобщенной машины;

J – приведенный момент инерции;

M, M_c – аксиальные векторы электромагнитного момента на валу двухполюсной машины и приведенного момента сопротивления;

m – количество фаз двигателя (в дальнейшем будем считать, что $m = 3$).

Перепишем уравнения (3.72) относительно векторов тока статора и потокоцепления ротора ψ_r в неподвижной системе координат. Полагая $\omega_k = 0$, находим

$$\left\{ \begin{array}{l} i_s = \frac{L_r}{L_r L_s - L_m^2} \left(- \left(R_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} \right) i_s + \frac{L_m}{L_r^2} R_r \psi_r - \frac{L_m}{L_r} \omega \psi_r + u_s \right) \\ \dot{\psi}_r = \frac{L_m}{L_r} R_r i_s - \frac{R_r}{L_r} \psi_r + \omega \psi_r \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J} (M - M_c) \\ M = \frac{3}{2} \psi_r i_s \end{array} \right. \quad (3.93)$$

Обозначив

$$\sigma = \frac{L_r L_s - L_r^2}{L_r}; k = \frac{L_m}{L_r}; \alpha = \frac{R_r}{L_r} \quad (3.94)$$

запишем полученные уравнения в более компактной форме

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma i_s = -R_s i_s - k(k R_r i_s - \alpha \psi_r + \omega \psi_r) + u_s \\ \dot{\psi}_r = k R_r i_s - \alpha \psi_r + \omega \psi_r \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J} (M - M_c) \\ M = \frac{3}{2} \psi_r i_s \end{array} \right. \quad (3.95)$$

Силовой преобразователь удобно представить в виде совокупности идеальных ключей, подсоединяющих каждую фазу двигателя к источнику питания на-

пряжением U_d . В этом случае компоненты u_α, u_β вектора выходного напряжения такого преобразователя в неподвижной системе координат (α, β) могут быть записаны следующим образом

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_d}{2} \begin{pmatrix} e_{a\alpha} & e_{b\alpha} & e_{c\alpha} \\ e_{a\beta} & e_{b\beta} & e_{c\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{sign } u_a \\ \text{sign } u_b \\ \text{sign } u_c \end{pmatrix}, \quad (3.96)$$

где U_d – напряжение источника питания звена постоянного тока;

$e_{a\alpha}, e_{b\alpha}, e_{c\alpha}, e_{a\beta}, e_{b\beta}, e_{c\beta}$ – проекции направляющих единичных векторов системы координат (α, β) на оси симметричной трехфазной системы;

$\text{sign } u_a, \text{sign } u_b, \text{sign } u_c$ – команды на подключение фаз преобразователя к «+» или «-» источника питания;

коэффициент $\sqrt{\frac{2}{3}}$ вводится при переходе от трехфазной систем двухфазной и обратно.

Вектор напряжения может принимать восемь значений $U^1 \dots U^8$ соответствующих различным структурам, образованным комбинациями команд управления, причем две из них $\text{sign } u_a = \text{sign } u_b = \text{sign } u_c = \pm 1$ дают нулевой вектор $U^1 = U^8 = U^0$.

Ток, потребляемый от источника питания, в этом случае может быть записан как

$$i_d = i_a \text{sign } u_a + i_b \text{sign } u_b + i_c \text{sign } u_c = (i_s, \text{sign } u_s), \quad (3.97)$$

где $(i_s, \text{sign } u_s)$ означает скалярное произведение двух векторов. Операции $\text{sign } u_s$ понимается в покомпонентном смысле.

Пусть векторы напряжения и тока двухфазной системы образуются как

$$u_2 = kE u_3, \quad u_2 = kE i_3, \quad (3.98)$$

где k – некоторый, пока неизвестный, коэффициент.

Поскольку мощности двух фазной обобщенной машины и реальной трехфазной должны быть равны, получаем

$$u_2^m i_2 = k^2 u_3^m E^T E i_3.$$

Но $E^T E = \frac{3}{2} I$ где I – единичная матрица. Отсюда следует, что $k^2 = \frac{2}{3}$ или $k = \sqrt{\frac{2}{3}}$. Посмотрим теперь, как преобразуются напряжения и токи при обратном переходе. Из (3.78) имеем

$$kE^T u_2 = k^2 E^T E u_3 = u_3, kE^T i_2 = k^2 E^T E i_3 = i_3 \quad (3.99)$$

Проверим, выполняется ли условие равенства мощностей. Запишем

$$u_3^m i_3 = k^2 u_2^m E^T E i_2 = u_2^m i_2$$

Таким образом, любой переход из одной системы фаз в другую должен сопровождаться умножением на коэффициент $k = \sqrt{\frac{2}{3}}$.

Итак, сформулируем задачу управления: требуется обеспечить равенство электромагнитного момента M заданному значению M_z в системе «силовой преобразователь – асинхронный двигатель», описываемой уравнениями (3.95), (3.96), если измерению доступен только ток i_d , потребляемый от источника питания. Напряжение источника питания постоянного тока U_d предполагается известным. Известны также некоторые из параметров схемы замещения, в частности, коэффициент рассеивания k_r , сопротивление статорной цепи R_s , индуктивности роторной цепи L_r .

Задачу будем решать в несколько этапов. Прежде всего, построим алгоритм управления электромагнитным моментом двигателя, полагая ток статора известным. На втором этапе строится наблюдатель тока статора по измерениям в цепи постоянного тока. И в завершении приводится алгоритм переключения силовых элементов преобразователя, минимизирующий суммарные коммутационные потери при заданной точности регулирования выходной переменной. Рассматриваются также вопросы регулирования частоты вращения вала двигателя [17, 204].

Управление электромагнитным моментом. Рассмотрим вновь уравнения асинхронного двигателя в виде (3.95)

$$\begin{cases} \sigma i_s = -R_s i_s - k_r(k_r R_r i_s - \alpha \psi_r + \omega \psi_r) + u_s \\ \psi_r = k_r R_r i_s - \alpha \psi_r + \omega \psi_r \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J}(M - M_c) \\ M = \frac{3}{2} \psi_r i_s \end{cases}$$

Вектор напряжения статора выступает в данном случае в качестве управляющего воздействия. Ток статора и параметры двигателя известны. Требуется обеспечить равенство электромагнитного момента заданному значению.

Прежде всего, заметим, что векторы тока статора и потокосцепления ротора лежат в одной плоскости. Следовательно, можно разложить вектор тока статора i_s по направлению потокосцепления ψ_r и ему перпендикулярному. Иначе говоря, представим вектор тока статора в виде комбинации

$$i_s = u\psi_r + v\psi_r \quad (3.100)$$

Здесь u – некоторый скаляр, v – аксиальный вектор, подлежащие определению. Подставим (3.100) в выражение для электромагнитного момента в (3.95). Применяя обычные операции векторной алгебры, находим

$$M = \frac{3}{2}\psi_r(u\psi_r + v\psi_r) = \frac{3}{2}(\psi_r, \psi_r)v - (\psi_r, v)\psi_r.$$

В силу ортогональности векторов ψ_r и v скалярное произведение

$$(\psi_r, v) = 0,$$

и, таким образом, получаем

$$M = \frac{3}{2}(\psi_r, \psi_r)v \quad (3.101)$$

Отсюда видно, что в создании момента участвуют две величины: потокосцепление ψ_r и пока неопределенный вектор v .

Рассмотрим вновь систему (3.95). Заметим, что первое уравнение в качестве малого параметра при производной содержит величину σ в пределе, стремящуюся к нулю (в идеальном двигателе при стремлении воздушного зазора к нулю, значение a также стремится к нулю). В этом случае движения в системе (3.95) разделяются на «быстрые» и «медленные» составляющие. Привлекая формальную процедуру исследования теории сингулярно-возмущенных уравнений, находим, что при $\psi_r = \text{const}$, $\omega = \text{const}$ собственные движения «быстрой» компоненты, образованной вектором i_s тока статора, устойчивы в силу $R > 0$, $\sigma > 0$.

Возвращаясь к системе (3.95) мы будем, таким образом, считать, что вектор тока статора i_s является безынерционным по отношению к потокосцеплению ψ_r и, следовательно, в силу (3.80) величины u , v также оказываются безынерционными.

Поскольку вектор напряжения u предполагаемый в качестве управления, входит в правую часть первого уравнения, то вектор r_s , а значит и компоненты u , v могут быть сделаны произвольными величинами. Подставляя (3.49) во второе уравнение (3.95), находим

$$\begin{cases} \dot{\psi}_r = R_r \left(u - \frac{1}{L_r} \right) \psi_r + (R_r v + \omega) \psi_r \\ M = \frac{3}{2} (\psi_r, \psi_r) v \end{cases} \quad (3.102)$$

Положим

$$u = \frac{1}{L_r} \frac{\Psi}{\|\psi_r\|}$$

В результате получим

$$\dot{\psi}_r = \frac{R_r}{L_r} \left(\frac{\Psi}{\|\psi_r\|} - 1 \right) \psi_r + (R_r v + \omega) \psi_r$$

Это уравнение типа Лъенара. Как известно, такого рода уравнения порождают предельный цикл в фазовом пространстве системы. В данном случае возникает устойчивый предельный цикл, представляющий собой окружность

$$\|\psi_r\| = \Psi \quad (3.103)$$

В установившемся режиме имеем

$$\dot{\psi}_r = (R_r v + \omega) \psi_r$$

Иначе говоря, вектор потокосцепления вращается в положительном направлении (против часовой стрелки) со скоростью $R_r v + \omega$. Величина $R_r v$ представляет, таким образом, абсолютное скольжение или, попросту говоря, разность скоростей вращения поля и вала двигателя. Отсюда, в частности, следует способ вычисления параметра v и скорости вращения поля ω_1

$$v = \frac{2}{3} \frac{M_z}{\Psi^2}; \quad \omega_1 = \frac{2}{3} \frac{M_z}{\Psi^2} R_r + \omega \quad (3.104)$$

К сожалению, реализация предложенного алгоритма сопряжена с трудностями, связанными, в основном, с отсутствием доступной информации о величине и направлении вектора потокосцепления. Измерения достаточно дорогостоящи и не технологичны. Для качественного восстановления магнитного потока необходима информация о частоте вращения вала. Существующие способы построения

наблюдателей потокосцепления в рамках бездатчикового привода предполагают чистое интегрирование измеренных величин (тока, напряжения), а это, в свою очередь, связано со всевозможными осложнениями типа дрейфа нуля, необходимости разного рода коррекций, настроек. Поэтому, решаем задачу косвенным путем, построив регулятор момента на основе имеющейся информации о токах и напряжениях статорной цепи [204]. Введем замену

$$y = kR_r i_s - \alpha \psi_r + \omega \psi_r; \quad (3.105)$$

$$U = -R_r i_s + u_s. \quad (3.106)$$

Предположим, что вектор y , также как и ток статора i_s доступен измерению. Перепишем систему (3.95)

$$\begin{cases} \sigma i_s = U - ky \\ \dot{\psi}_r = y \\ \dot{y} = k' U - \alpha' y + \omega y + \dot{\omega} \psi_r \\ M = \frac{3}{2} \psi_r i_s \end{cases} \quad (3.107)$$

Здесь

$$k' = \frac{kR_r}{\sigma}; \quad \alpha' = \frac{k^2 R_r}{\sigma} + \alpha \quad (3.108)$$

Учитывая значительно более высокие темпы изменения электромагнитных переменных, опустим на предварительном этапе члены, содержащие $\dot{\omega}$. В результате получим

$$\begin{cases} \sigma i_s = U - ky \\ \dot{\psi}_r = y \\ \dot{y} = k' U - \alpha' y + \omega y \\ M = \frac{3}{2} \psi_r i_s \end{cases} \quad (3.109)$$

Рассмотрим уравнение относительно y с управляющим воздействием U . Положим

$$U = \frac{1}{k'} \left(\alpha' Y \frac{y}{\|y\|} + \Delta \omega y \right) \quad (3.110)$$

где $\| \cdot \|$ обозначает евклидову норму вектора;

$y - \text{const}$;

$\Delta \omega = \omega_1 - \omega$.

Подстановка в (3.109) дает

$$\begin{cases} \sigma i_s = \frac{1}{k} \left(\left(\alpha' \frac{Y}{\|y\|} - k k' \right) y + \Delta \omega y \right) \\ \psi_r = y \\ \dot{y} = \alpha' \left(\frac{Y}{\|y\|} - 1 \right) y + \omega y \\ M = \frac{3}{2} \psi_r i_s \end{cases} \quad (3.111)$$

Как видно, и в этом случае получили уравнение Лъенара с устойчивым предельным циклом в виде окружности в проекции на подпространство Y

$$\|y\| = Y.$$

В установившемся режиме уравнение относительно y принимает вид

$$\dot{y} = \omega_1 y,$$

и означает, что вектор y величиной Y вращается с частотой ω_1 в положительном направлении. В то же время, в силу системы и, опять-таки, для установившегося режима, учитывая

$$\alpha' = \frac{R_r L_s}{\sigma L_r} + \alpha; \quad k' = \frac{R_r L_m}{\sigma L_r};$$

имеем

$$i_s = \frac{L_r v}{\omega_1 L_m} y - \frac{1}{\omega_1 L_m} y, \quad (3.112)$$

где

$$\omega_1 = \omega + R_r v. \quad (3.113)$$

Таким образом,

$$I_s = \frac{Y}{\sigma \omega_1} \sqrt{\left(\frac{\alpha'}{k'} - k \right)^2 + \left(\frac{\Delta \omega}{k'} \right)^2}; \quad \omega_1 \Psi = Y \quad (3.114)$$

Отсюда следует, что и вектор потокосцепления ψ_r величиной ψ , равно как и вектор тока статора i_s амплитудой I_s вращаются с той же частотой и в том же направлении. Однако, векторы i_s , ψ_r как видно из уравнений, определены с точностью до постоянных. Возникают опасения, связанные с возможным дрейфом нуля и т.д. В то же время, наличие связи (3.106) между переменными снимает эти опасения естественным образом. Действительно, вектор y не имеет постоянной составляющей в силу замкнутой системы. Между тем условие (3.106) представляет, вообще говоря, соотношение с переменными коэффициентами, хотя и предпола-

галось $Y - \text{const}$. Ясно, что в этом случае относительно постоянных может иметь место только тривиальное решение.

Итак, в замкнутой системе (3.101) амплитуда потокосцепления определяется значением Y , параметр ν и частота вращения поля ω_1 выражениями (3.104). Напряжение статора с учетом (3.94) у (3.108) находится как

$$u_s = \frac{L_s}{L_m} Y \frac{y}{\|y\|} + \frac{\sigma}{k} \nu y + R_s i_s. \quad (3.115)$$

Существенно, что полученное выражение не содержит активного сопротивления роторной цепи, поскольку именно этот параметр подвержен довольно значительным колебаниям при изменении теплового режима двигателя, вследствие более худших условий охлаждения ротора. Остальные параметры, в том числе индуктивности, хотя и меняются в зависимости от глубины насыщения магнитной цепи, входят в выражение в виде отношений, как следствие, их изменения начинают проявляться лишь при глубоком насыщении магнитной системы. То же относится и к коэффициенту A ; который также представляет собой отношение индуктивностей L_m и L_r . Коэффициент рассеивания в соответствии с (3.5) может быть представлен в виде $\sigma = L_{\sigma s} + kL_{\sigma r}$ и, как видно, также практически не зависит от степени насыщения машины. Наконец, активное сопротивление статорной цепи R_s , находясь в более выгодных условиях охлаждения, изменяется в гораздо меньших пределах по отношению к роторному сопротивлению при тех же режимах эксплуатации. Таким образом, появляется принципиальная возможность для построения высокоточного регулятора момента на валу двигателя.

Рассмотрим задачу формирования статических режимов работы электропривода или, что то же самое, заданных значений Y и Ψ . Прежде всего, отметим два обстоятельства, определяющих, в конечном счете, подходы к решению этой задачи. С одной стороны, если речь идет о приводах технологического назначения, где зачастую требуются высокое быстродействие и повышенная перегрузочная способность, то на первый план выступают именно эти характеристики, в то время как вопросы энергетической эффективности остаются на втором плане. Как следствие, в таких приводах необходимо поддерживать магнитную цепь машины

вблизи насыщения во всем диапазоне скоростей и моментов. Известно, что для двигателей промышленного применения постоянная времени контура намагничивания, как правило, на порядок превышает постоянную времени токовой цепи. Поэтому высокое быстродействие можно обеспечить только за счет контура тока. Таким образом, необходимо поддерживать машину в определенном режиме с тем, чтобы невелировать внезапно возникающие внешние возмущения в виде момента сопротивления, а также задающего воздействия по моменту или скорости. В противовес этому, тяговые приводы большой мощности, автономные приводы, работающие на инерционную нагрузку, выдвигают на первый план задачу повышения энергетической эффективности и, таким образом, требуют формирования заданных значений на оптимальном уровне с точки зрения минимума потерь мощности в системе силовой преобразователь - двигатель. Наконец, и для тех и для других приводов имеют место ограничения по току и напряжению, которые, в свою очередь, накладывают ограничения на формирование заданных значений. Так, при больших частотах вращения ротора в целях расширения диапазона регулирования необходимо уменьшать поток намагничивания из-за недостатка напряжения питания для обеспечения требуемого тока статора вследствие увеличения противо-ЭДС вращения. В диапазоне малых частотах вращения на передний план выступают ограничения по току двигателя. В общем случае, всякая задача формирования желаемого режима работы всегда может быть уложена в классическую схему оптимального управления, корректная постановка которой, однако, возможна лишь при наличии математической модели объекта регулирования. В свою очередь, последняя включает в себя как часть модель механической, гидравлической и т.д. подсистемы, приводимой в действие электроприводом. Ясно, что в этой ситуации речь не может идти об универсальности привода, поскольку решается вполне конкретная задача. И, наоборот, желая достичь определенной степени универсальности, приходится жертвовать либо энергетикой привода, либо его быстродействием.

Будем полагать, что основное назначение привода состоит в его технологическом применении. В этом случае, как уже отмечалось, основным требованием

при формировании статических режимов работы выступает необходимость поддержания магнитной цепи машины вблизи насыщения при учете действующих ограничений по току и напряжению. Известные способы решения этой проблемы сопровождаются довольно громоздкими зависимостями и, соответственно, ведут к усложнению в реализации. В данном случае вопрос решается особенно просто: при малых частотах вращения, формирование происходит при $\Psi = \text{const}$, при больших частотах вращения, постоянной поддерживается величина Y . Переход осуществляется по частоте вращения в точке сопряжения двух характеристик. Учитывая выражение для мощности двигателя

$$P = M\omega,$$

находим частоту вращения ω_c , в точке сопряжения

$$\omega_c = \frac{P_{max}}{M_{max}}. \quad (3.116)$$

Отсюда, согласно (3.101), получаем

$$v_c = \frac{2 M_{max}}{3 \Psi_{max}^2} \quad (3.117)$$

В то же время, в условиях ограничения по току, а также при минимизации статических потерь в системе «силовой преобразователь – двигатель», максимум момента достигается при значении v , равном

$$v_c = \frac{1}{L_r}$$

Тогда максимальное значение потокосцепления ротора Ψ определится как

$$\Psi_{max} = \sqrt{\frac{2}{3} L_r M_{max}} \quad (3.118)$$

Полагая, что машина спроектирована оптимально и магнитопровод используется полностью, будем считать, что полученное значение потокосцепления является предельным по условиям насыщения магнитной цепи двигателя.

Определяя с помощью (3.113), (3.116), (3.117), (3.114) максимальное значение Y , находим

$$Y_{max} = \sqrt{\frac{2 P_{max} L_r + M_{max} R_r}{3 \sqrt{L_r M_{max}}}} \quad (3.119)$$

Частота вращения поля в точке сопряжения в соответствии с (3.46), (3.47) принимает значение

$$\omega_{1c} = \frac{P_{max}L_r + M_{max}R_r}{L_r M_{max}} \quad (3.120)$$

Таким образом, формирование заданных значений Y осуществляется по формуле (3.114)

$$Y = \omega_1 \Psi$$

При этом, в диапазоне частот $|\omega| < \omega_c$ потокосцепление ротора определяется выражением (3.118), в то время как при частотах $|\omega| > \omega_c$ величина Y сохраняется на уровне Y_{max} согласно (3.119).

Электромагнитный момент описывается

$$M = \begin{cases} \frac{3}{2} \Psi^2 v, & \text{при } |\omega| \leq \omega_c \\ \frac{3}{2} \frac{Y^2}{\omega_1^2} v, & \text{при } |\omega| > \omega_c \end{cases} \quad (3.121)$$

Как видно, в обоих случаях момент является линейной функцией параметра v . Несмотря на то, что в определении величины ω_1 участвует сопротивление ротора R_r , меняющееся в довольно широких пределах, его влияние на ω_1 само по себе незначительно, поскольку добавка $R_r v$ в этих условиях оказывается значительно меньшей частоте вращения вала двигателя ω . Соответственно, параметр v может быть представлен в виде

$$v = \begin{cases} \frac{3M_z}{2\Psi^2} v, & \text{при } |\omega| \leq \omega_c \\ \frac{3M_z \omega_1^2}{2Y^2} v, & \text{при } |\omega| > \omega_c \end{cases} \quad (3.122)$$

и ограничен значениями: $M_z = M_{max}$ – в диапазоне малых частот; $M_z = \frac{P_{max}}{\omega}$ – при большой частоте. Отметим, что указанные ограничения следует учитывать «в среднем», поскольку в переходных режимах очень часто бывает допустимо и даже целесообразно превышение указанных ограничений, если это превышение не приводит к перегреву привода. Так или иначе, решение этого вопроса должно осуществляться в рамках задачи оптимального управления и выходит за рамки данной работы.

Обратим внимание на то, что приведенный алгоритм формирования заданных значений в случае необходимости дает возможность реализовать энергетически более выгодный режим работы привода, хотя и в ущерб его быстродействию. В работе показано на основе анализа двух известных альтернативных вариантов минимизации потерь в приводе, в частности, режимов минимума тока статора и минимума суммарных омических потерь в двигателе, что учет потерь в преобразователе однозначно решает вопрос в пользу первого варианта. В этом случае параметр ν принимает вполне определенное значение, равное $\frac{1}{L_r}$, и регулирование электромагнитного момента осуществляется за счет изменения величин Ψ и Y в соответствии с выражениями (3.121) или (3.122).

В довершение, оценим влияние ограничения по напряжению на формирование желаемого режима работы. В установившемся режиме в силу равенства $\|y\| = Y$, а также учитывая (3.112), (3.115), находим

$$u_s = \frac{L_s \omega_1 + L_r \nu R_s}{L_s \omega_1} y + \frac{\sigma L_r \omega_1 + R_s}{L_m \omega} y \quad (3.123)$$

Отсюда модуль напряжения статора

$$U_s = \frac{(L_s \omega_1 + L_r \nu R_s)^2 + (\sigma L_r \omega_1 + R_s)^2}{L_m \omega_1} Y \quad (3.124)$$

Обращая внимание на то, что указанное ограничение начинает сказываться лишь при больших частотах вращения. В этом случае активное сопротивление статорной цепи R_s несоизмеримо мало по сравнению с индуктивным сопротивлением $L_s \omega_1$. К тому же, как правило, $\sigma \ll L_s$. Таким образом, оказывается, что $U_s \approx Y$, и относительно небольшой запас по напряжению полностью снимает это ограничение. Более точные вычисления приводят лишь к незначительным вариациям U_s относительно величины Y (в пределах 10%).

Результаты моделирования алгоритма управления приведены на рисунке 3.17. При моделировании использовался асинхронный двигатель со следующими параметрами:

$\omega_1 \dots 2500 \text{ с}^{-1}$ P_{\max} , кВт	15
момент на валу максимальный до скорости 1000 с^{-1} M_{\max} , Нм	15

напряжение питания в цепи постоянного тока U_d , В	120
индуктивность рассеивания статора L_s , Гн	$0,0603 \cdot 10^{-3}$
индуктивность рассеивания ротора L_r , Гн	$0,0658 \cdot 10^{-3}$
индуктивность контура намагничивания L_m , Гн	$0,804 \cdot 10^{-3}$
активное сопротивление обмотки статора R_s , Ом	0,0269
активное сопротивление обмотки ротора R_r , Ом	0,02048

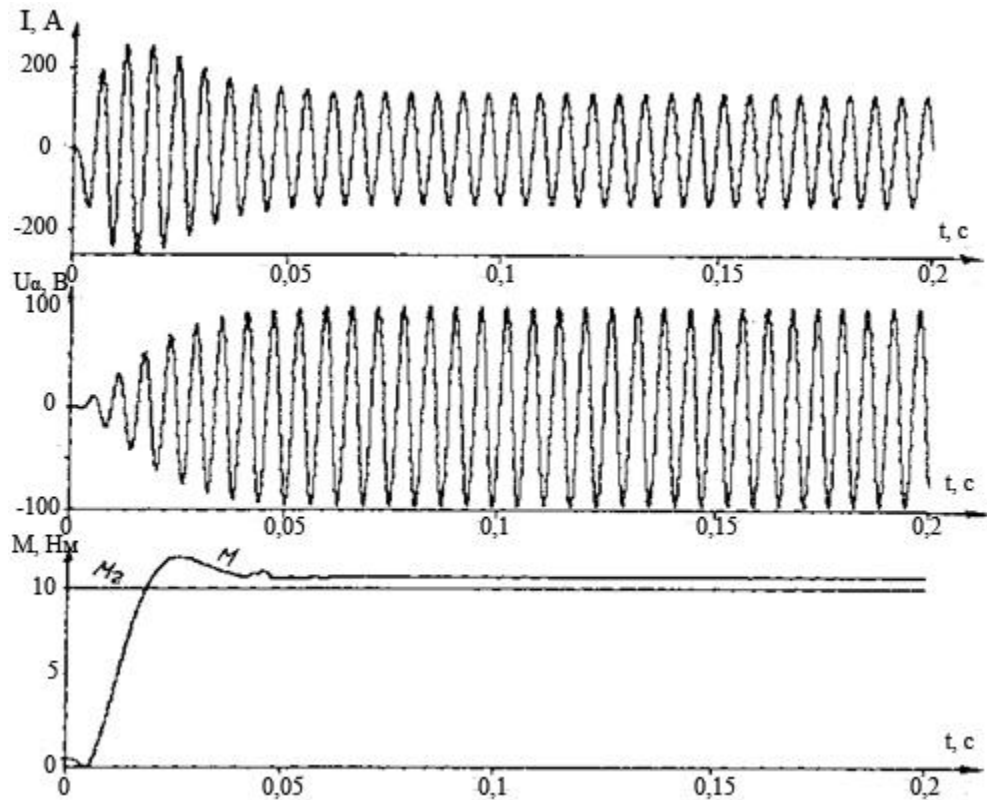


Рисунок 3.17 – Результаты моделирования регулятора электромагнитного момента.

Мощность максимальная в диапазоне частот вращения 1000

Рассмотренный алгоритм управления двигателем основан на предположении о том, что векторы тока статора i_s и вновь введенной переменной u являются измеряемыми величинами. Между тем в исходной постановке измеряется только ток i_d потребляемый от источника питания. Таким образом, возникает задача восстановления тока статора и переменной u по измерениям тока потребления i_d .

Восстановление тока статора по измеренным значениям тока потребления

Рассмотрим первое уравнение (3.109)

$$\{\sigma i_s = U - ky;$$

и перепишем его, учитывая выражение (3.36) для U_s ,

$$\{\sigma i_s = -R_r i_s + u_s - ky \quad (3.125)$$

Построим наблюдатель в форме

$$\{\sigma \hat{i}_s = -R_r \hat{i}_s + u_s - \lambda \quad (3.126)$$

где векторная величина λ выполняет функцию управления и подлежит определению. В этом случае уравнение в невязках принимает вид

$$\{\sigma \bar{i}_s = -R_r \bar{i}_s + u_s - \lambda \quad (3.127)$$

Сформируем оценку \hat{i}_d потребляемого тока в соответствии с выражением (3.27), получим

$$\hat{i}_d = (\hat{i}_s \text{sign } u_s) \quad (3.128)$$

Тогда невязка по току потребления запишется как

$$\bar{i}_d = i_d \hat{i}_d = (\bar{i}_s \text{sign } u_s) \quad (3.129)$$

Управление вида

$$\lambda = -k_I (\bar{i}_d) \text{sign } u_s = -k_I (\bar{i}_s, \text{sign } u_s) \text{sign } u_s \quad (3.130)$$

решает задачу наблюдения.

Действительно, подставляя (3.120) в уравнение (3.127), имеем

$$\{\sigma \bar{i}_s = -R_r \bar{i}_s - ky - k_I (\bar{i}_s, \text{sign } u_s) \text{sign } u_s \quad (3.131)$$

Как видно при достаточно большом k_I слагаемое $-ky$ можно считать величиной «медленно» изменяющейся и соответственно, отнести «медленной» подсистеме. Тогда по аналогии с процедурой разделения движений теории сингулярно-возмущенных систем можно считать его и вовсе постоянным. Полагая $ky = 0$ и рассматривая невозмущенную систему, находим

$$\{\sigma \bar{i}_s = -R_r \bar{i}_s - k_1 (\bar{i}_s, \text{sign } u_s) \text{sign } u_s.$$

Составим функцию Ляпунова

$$V = \sigma (\bar{i}_s, \bar{i}_s) \quad (3.132)$$

и продифференцируем ее на траекториях невозмущенной системы. Получим

$$V = 2\sigma (\bar{i}_s, \bar{i}_s) = 2(-R_r (\bar{i}_s, \bar{i}_s)) - (k_1 (\bar{i}_s, \text{sign } u_s)^2) \quad (3.133)$$

Очевидно, что производная функции Ляпунова всюду отрицательна, за исключением точки $i_s = 0$.

Обратим внимание на то, что последнее слагаемое в (3.133) может обращаться в нуль вне точки равновесия. Такая ситуация может возникнуть, если $\text{sign} u_{a,b,c} = \pm 1$. Как уже отмечалось, эта комбинация порождает нулевой вектор напряжения, и скалярное произведение $(i_s, \text{sign} u_s)$ в проекции на оси трехфазной системы принимает вид

$$(\bar{i}_s, \text{sign} u_s) = \pm(\bar{i}_a + \bar{i}_b + \bar{i}_c).$$

Но, как известно, в трехфазной цепи при соединении обмоток двигателя «звездой»

$$i_a + i_b + i_c = 0.$$

Следовательно, в пространстве состояний системы в невязках (3.131) появляется инвариантная поверхность

$$\bar{i}_a + \bar{i}_b + \bar{i}_c = 0.$$

Если вдруг оказалось, что $i_a + i_b + i_c = 0$. В этом случае производная функции Ляпунова для возмущенной системы (3.131) может обращаться в нуль за пределами точки равновесия $\bar{i}_s = 0$, если $-R_s(\bar{i}_s, \bar{i}_s) - (ky, \bar{i}_s) = 0$.

Однако, множество точек на оси времени, образованное комбинациями $\text{sign} u_{a,b,c} = \pm 1$ имеет нулевую меру. Иначе говоря, рассмотренная ситуация может иметь место лишь в изолированные моменты времени, а значит и вовсе не возникнет. Этот факт имеет принципиальное значение для обоснования устойчивости возмущенной системы, поскольку в этом случае за счет увеличения коэффициента k_1 можно свести невязку по току к нулю, хотя и только в асимптотике.

Таким образом, учитывая $\bar{i}_s \rightarrow 0$, получаем $\lambda = ky$, соответственно,

$$y = \lambda/k \tag{3.134}$$

и в дальнейшем можно считать, что переменная y , равно как и ток статора, доступны для измерения. Однако, следует иметь в виду, что вектор y , полученный таким образом, является разрывным и совпадает с истинным значением «в среднем».

В проекции на оси трехфазной системы получим

$$\begin{cases} \sigma \hat{i}_a = -R \hat{i}_a + u_a - k y_a + k_1 \bar{i}_d \text{sign } u_a \\ \sigma \hat{i}_b = -R \hat{i}_b + u_b - k y_b + k_1 \bar{i}_d \text{sign } u_b \\ \sigma \hat{i}_c = -R \hat{i}_c + u_c - k y_c + k_1 \bar{i}_d \text{sign } u_c \end{cases} \quad (3.135)$$

где фазные напряжения u_a, u_b, u_c вычисляются по формулам (3.98), (3.99) и принимают вид

$$\begin{cases} u_a = \frac{2}{3} U_d (2 \text{sign } u_a - \text{sign } u_b - \text{sign } u_c) \\ u_b = \frac{2}{3} U_d (-\text{sign } u_a + 2 \text{sign } u_b - \text{sign } u_c) \\ u_c = \frac{2}{3} U_d (-\text{sign } u_a - \text{sign } u_b + 2 \text{sign } u_c) \end{cases}$$

Результаты моделирования тока статора приведены на рисунке 3.18.

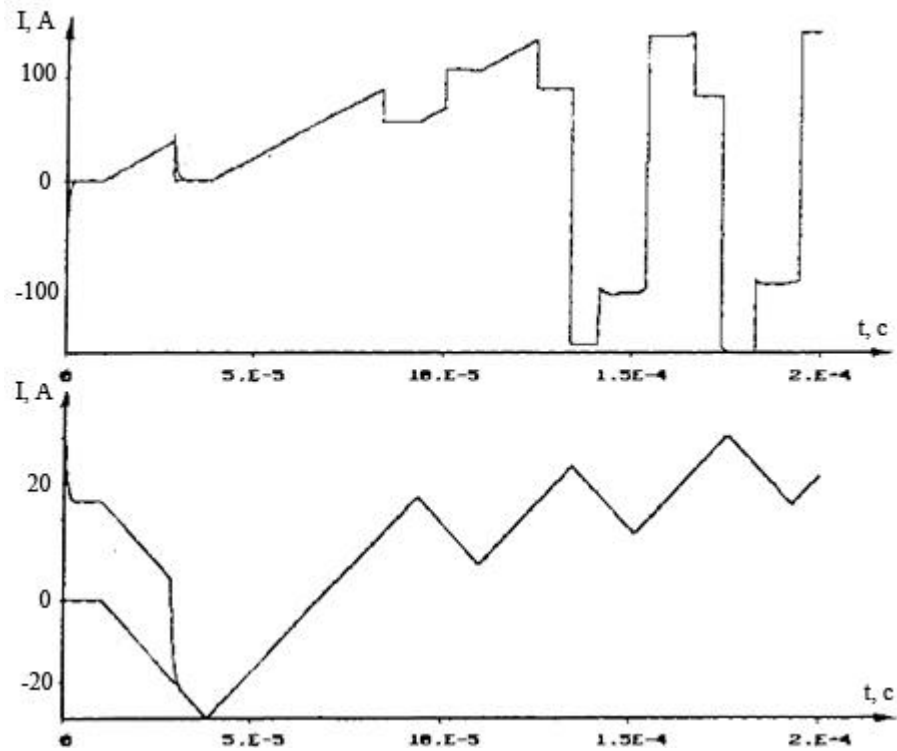


Рисунок 3.18 – Результаты моделирования тока статора

Регулирование скорости вращения вала. Одна из основных проблем, возникающих при построении регулятора скорости в бездатчиковом электроприводе, связана с необходимостью получения информации о текущей скорости вращения вала двигателя. Причем для достижения широкого диапазона регулирования, что характерно для высококачественных приводов, требуется высокая точность определения скорости. Применение навесных датчиков скорости снижает практически до нуля основное преимущество бездатчикового привода. Известные способы

восстановления скорости вращения недостаточно строго обоснованы и, к тому же, сильно зависят от параметров двигателя, основным из которых является активное сопротивление роторной цепи. Как уже отмечалось, именно эта величина меняется в значительных пределах при изменении теплового режима двигателя. Поэтому всякий алгоритм, использующий сопротивление ротора в качестве настроечного коэффициента, должен иметь контур адаптации для устранения или компенсации температурного дрейфа сопротивления роторной цепи. В свою очередь, это ведет к усложнению алгоритма и снижению надежности привода в целом. Тем не менее, в рамках предложенного подхода оказывается возможным достигнуть приемлемой точности восстановления скорости, не прибегая к дополнительным адаптирующим процедурам.

$$\dot{y} = k'U - \alpha'y + \omega y \quad (3.136)$$

Учитывая согласно (3.108), что

$$k' = \frac{kR_r}{\sigma}; \quad \alpha' = \frac{k^2R_r}{\sigma} + \alpha;$$

и подставляя затем выражения коэффициентов в соответствии с (3.94), получим

$$k' = \frac{R_r L_m}{\sigma L_r}; \quad \alpha' = \frac{R_r L_s}{\sigma L_r} \quad (3.137)$$

Уравнение (3.136) можно записать в виде

$$\dot{y} = \frac{R_r}{\sigma} \left(\frac{L_m}{L_r} U - \frac{L_s}{L_r} y \right) + \omega y;$$

или

$$\dot{y} = \frac{R_r}{\sigma} y^* + \omega y; \quad (3.138)$$

где

$$y^* = \frac{L_m}{L_r} U - \frac{L_s}{L_r} y. \quad (3.139)$$

Построим наблюдатель в форме

$$\hat{y} = v_1 y^* + v_2 y \quad (3.140)$$

Здесь v_1, v_2 – скалярная и векторная величины, рассматриваемые в качестве управлений и подлежащие определению.

Уравнение в невязках примет вид

$$\bar{y} = \left(\frac{R_r}{\sigma} - v_1\right) y^* + (\omega - v_2) y \quad (3.141)$$

Требуется подобрать управляющие воздействия v_1, v_2 чтобы невязки свести к нулю.

Задачу будем решать в классе систем с разрывными воздействиями. С этой целью составим функции переключения

$$s_1 = (y, \bar{y}); s_2 = y^* \bar{y} \quad (3.142)$$

и продифференцируем их в силу (3.141). Учитывая

$$(y, (\omega - v_2)y) = 0;$$

$$y^*((\omega - v_2)y) = (\omega - v_2)(y^*, y) - y(y^*, (\omega - v_2)) = (\omega - v_2)(y, y^*);$$

получим

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = (y, \bar{y}) + (\dot{y}, \bar{y}) = \left(\frac{R_r}{\sigma} - v_1\right) (y, y^*) + (\dot{y}, \bar{y}); \\ \dot{s}_2 = y^* \bar{y} + \dot{y}^* \bar{y} = (\omega - v_2)(y^*, y) + \dot{y}^* \bar{y}. \end{cases} \quad (3.143)$$

В данном случае слагаемые $(\dot{y}, \bar{y}), \dot{y}^* \bar{y}$ принимаются в качестве возмущающих воздействий.

Рассматривая невозмущенную систему, находим

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = (y, \bar{y}) + (\dot{y}, \bar{y}) = \left(\frac{R_r}{\sigma} - v_1\right) (y, y^*); \\ \dot{s}_2 = y^* \bar{y} + \dot{y}^* \bar{y} = (\omega - v_2)(y^*, y). \end{cases} \quad (3.144)$$

Заметим, что каждое из этих уравнений содержит множителем величину (y^*, y) , которая с учетом (3.110), (3.127) принимает вид

$$(y^*, y) = \frac{L_s}{L_r} (y, y) \left(\frac{Y}{\|y\|} - 1\right) = \frac{L_s}{L_r} \|y\| (Y - \|y\|).$$

Но в установившемся режиме изображающая точка попадает на окружность $Y = \|y\|$, являющуюся предельным циклом. Как следствие, правые части уравнений (3.144) становятся равными нулю и управляющие воздействия v_1, v_2 не оказывают влияния на поведение системы. Однако, учитывая то, что достижение предельного цикла возможно только асимптотически, а также практически нулевую вероятность точного попадания на окружность, дополненную неучтенными неидеальностями исполнительных устройств, заключаем, что

$$(y^*, y) \neq 0.$$

Управления вида

$$v_1 = V_1 \text{sign} s_1(y^*, y); v_2 = V_2 \text{sign} s_2(y^*, y); \quad (3.145)$$

обеспечивают попадание на пересечение поверхностей разрыва $s_1 = 0$, $s_2 = 0$ и решают, таким образом, задачу восстановления величин R_r , ω , если

$$V_1 > \frac{R_r}{\sigma}; V_2 > \omega.$$

Действительно, вычисляя эквивалентные управления, находим

$$v_{1eq} = \frac{R_r}{\sigma}; v_{2eq} = \omega. \quad (3.146)$$

Эквивалентное управление может быть получено с помощью фильтра первого порядка при соответствующем согласовании его постоянной времени с частотой скользящего режима и динамикой движения системы в скользящем режиме. В данном случае имеем

$$\tau \hat{\omega} = v_2 - \hat{\omega}; \hat{\omega} = v_{2eq}. \quad (3.147)$$

Ситуация немного сложнее для возмущенной системы (3.123). Однако и в этом случае, учитывая, что $(y^*, y) \neq 0$, удастся обеспечить попадание на пересечение поверхностей разрыва $s_1 = 0$, $s_2 = 0$ за счет больших коэффициентов V_1 , V_2 . В то же время, функции s_1 , s_2 представляют в силу неравенства $(y^*, y) \neq 0$ линейно независимые комбинации вектора невязок \bar{y} . Следовательно, выполнение $s_1 = 0$, $s_2 = 0$ влечет за собой $\bar{y} = 0$. Иначе говоря, при возникновении скользящего режима возмущающие воздействия (\dot{y}, \bar{y}) , $\dot{y}^* \bar{y}$ тождественно равны нулю. Учитывая, что темпы движения в системе (3.143) на этапе попадания на пересечение поверхностей разрыва могут быть сделаны произвольными, и сознательно ухудшая точность регулирования амплитуды $\|y\|$, поскольку она не оказывает решающего влияния на точность управления механическими переменными, можно добиться решения задачи восстановления, не прибегая к большим коэффициентам.

Результаты моделирования наблюдателя скорости вращения и активного сопротивления роторной цепи приведены на рисунке 3.19.

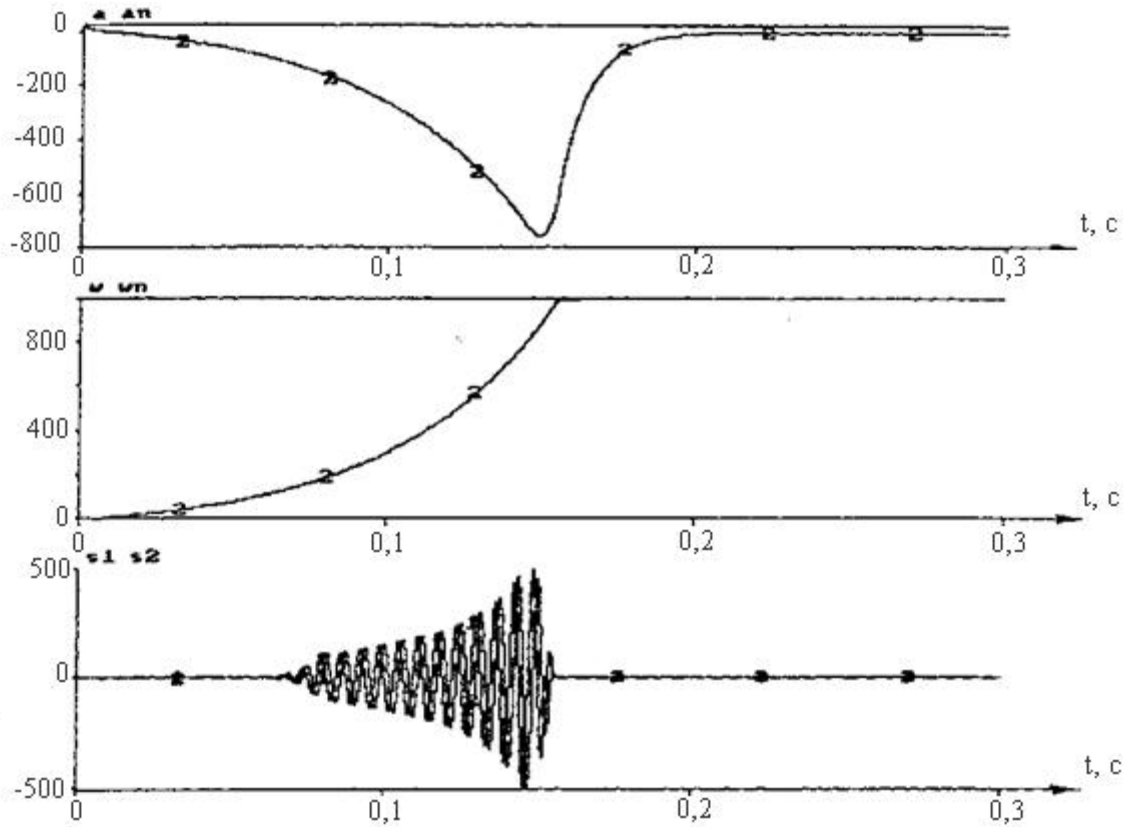


Рисунок 3.19 – Результаты моделирования наблюдателя скорости и активного сопротивления ротора

Рассмотрим, собственно, задачу регулирования скорости вращения вала электродвигателя. Выписывая уравнение вращательного движения (3.107) с учетом (3.121), (3.33), а также уравнение оценки скорости (3.147), получим

$$\begin{cases} J\dot{\omega} = \frac{3}{2}\Psi^2 v - M_c; \\ \tau\dot{\hat{\omega}} = v_2 - \hat{\omega}. \end{cases} \quad (3.148)$$

В отношении момента сопротивления M_c не делается никаких предположений, кроме, его ограниченности. Управляющее воздействие v считается безынерционным.

Решение задачи в такой постановке известно и достигается организацией скользящего режима в контуре с асимптотическим наблюдателем состояния. В этом случае замкнутая система принимает вид

$$\begin{cases} J\hat{\omega} = \frac{3}{2}\Psi^2 v + K\bar{\omega}; \\ J\bar{\omega} = -K\bar{\omega} - M_c; \\ v = -V \text{sign}(\hat{\omega} - \omega_z); \\ \bar{\omega} = v_{2eq} - \hat{\omega}. \end{cases} \quad (3.149)$$

где ω_z – заданное значение скорости.

Однако, как нетрудно заметить, сведение невязки к нулю возможно только в асимптотике, при бесконечно большом коэффициенте K . В то же время, хотелось бы использовать инвариантные свойства скользящего режима к воздействию внешнего возмущения M_c , как это может быть сделано, если скорость ω измеряется абсолютно точно. Поэтому, несмотря на известный факт о возбуждении автоколебаний в системах с динамическими неидеальностями в канале измерения, определим возможности скользящего режима в случае, когда измеряемой величиной является $\hat{\omega}$. С этой целью рассмотрим эквивалентную систему

$$\begin{cases} \dot{x} = v - f; \\ \dot{y} = x - y \end{cases} \quad (3.150)$$

Очевидно, что уравнения (3.148) могут быть без труда приведены к подобному виду. В данном случае выходной переменной является y ; f – внешнее возмущение. Управляющее воздействие имеет вид

$$v = -\text{sign}y.$$

Рассмотрим поведение системы в случае, когда $f = 0$. Имеем

$$\begin{cases} \dot{x} = -\text{sign}y; \\ \dot{y} = x - y \end{cases} \quad (3.151)$$

Предполагая в качестве основного инструмента исследования метод усреднения, рассмотрим невозмущенную систему, в роли которой выступают уравнения

$$\begin{cases} \dot{x} = -\text{sign}y; \\ \dot{y} = x \end{cases} \quad (3.152)$$

В установившемся режиме решения представляют собой периодические функции, изменяющиеся с некоторой частотой ω . Как нетрудно заметить, в этом случае разрывное воздействие образует симметричную последовательность прямоугольных импульсов, следующих с той же частотой ω . В силу периодичности

решений, анализ установившегося режима достаточно провести для интервала $t \in [0, T)$, где $T = \frac{2\pi}{\omega}$ - период колебаний. Положим для определенности, что

$$\text{signy} = \begin{cases} +1; & t \in [0, \frac{T}{2}) \\ -1; & t \in [\frac{T}{2}, T) \end{cases};$$

Тогда общие решения на каждом интервале примут вид

$$\begin{aligned} t &\in [0, \frac{T}{2}); t \in [\frac{T}{2}, T) \\ x &= -t + A_1; x = t + B_1 \\ y &= -\frac{t^2}{2} + A_1 t + A_2; y = \frac{t^2}{2} + B_1 t + B_2. \end{aligned}$$

В силу периодичности и непрерывности искомых решений запишем

$$\begin{aligned} x(0) &= x(T); x\left(\frac{T}{2}-\right) = x\left(\frac{T}{2}+\right); \\ y(0) &= y(T); y\left(\frac{T}{2}-\right) = y\left(\frac{T}{2}+\right); \end{aligned}$$

Учитывая, что в точках разрыва $y(0) = y\left(\frac{T}{2}\right) = y(T) = 0$ и разрешая полученные уравнения относительно неизвестных постоянных, находим

$$A_1 = x(0); A_2 = 0; B_1 = -3x(0); B_2 = 4x(0)^2; T = 4x(0).$$

Как видно, все константы и, в частности, амплитуда A_1 переменной x и период T колебаний являются линейной функцией начальных условий $x(0)$. Отсюда следует, что

$$A_1 \omega = A_1 \frac{2\pi}{T} = \frac{x(0)2\pi}{4x(0)} = \frac{\pi}{2} - \text{const.}$$

Иначе говоря, для данной системы имеет место инвариантное соотношение

$$A\omega = C - \text{const}, \quad (3.153)$$

где A , ω – амплитуда и частота колебаний переменной x .

Вернемся вновь к системе (3.151) и проведем ее анализ методом усреднения. С этой целью рассмотрим невозмущенную систему (3.152)

$$\begin{cases} \dot{x} = -\text{signy}; \\ \dot{y} = x \end{cases}$$

Полагая

$$x = A \cos(\omega t + \varphi);$$

и выделяя основную гармонику в разрывном воздействии

$$\text{signy} = \frac{4}{\pi} \sin(\omega t + \varphi),$$

получим инвариантное соотношение (3.153) в виде

$$A\omega = \frac{4}{\pi}. \quad (3.154)$$

Тогда

$$y = \frac{A}{\omega} \sin(\omega t + \varphi).$$

Возвращаясь к исходной системе (3.151), введем формулы замены переменных

$$x = A \cos(\omega t + \varphi); y = \frac{A}{\omega} \sin(\omega t + \varphi); A\omega = \frac{4}{\pi} \quad (3.155)$$

Здесь A, ω, φ – новые переменные.

Дифференцируя соотношения (3.155) в силу системы (3.151), получим

$$\begin{cases} \dot{A} \cos(\omega t + \varphi) - A(\dot{\omega} t + \dot{\varphi}) \sin(\omega t + \varphi) = 0; \\ \dot{A} \sin(\omega t + \varphi) + A(\dot{\omega} t + \dot{\varphi}) \cos(\omega t + \varphi) = A \left(\frac{\dot{\omega}}{\omega} - 1 \right); \\ \dot{\omega} = -\frac{\dot{A}}{A} \omega. \end{cases}$$

Выписывая уравнения относительно новых переменных, находим

$$\begin{cases} \dot{A} = -A \frac{\sin^2(\omega t + \varphi)}{1 + \sin^2(\omega t + \varphi)}; \\ \dot{\omega} = -\frac{1}{2} \frac{\sin^2(\omega t + \varphi)}{1 + \sin^2(\omega t + \varphi)} - \frac{\sin 2(\omega t + \varphi)}{1 + \sin^2(\omega t + \varphi)} \omega t; \\ \omega = \frac{4}{A\pi}. \end{cases} \quad (3.156)$$

Обозначив $\omega t + \varphi = \theta$, проделаем процедуру усреднения полученных уравнений. Промежуточные вычисления дают

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \frac{d\theta}{1 + \sin^2 \theta} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{d\theta}{1 + \sin^2 \theta} = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi} \text{arctg}(\sqrt{2} \text{tg} \theta) \Big|_{-\pi}^{\pi} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi};$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \frac{\sin^2 \theta}{1 + \sin^2 \theta} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \left(1 - \frac{1}{1 + \sin^2 \theta} \right) d\theta = 1 - \frac{1}{\sqrt{2}\pi};$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \frac{\sin 2\theta}{1 + \sin^2 \theta} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \frac{\sin 2\theta}{3 - \cos 2\theta} d\theta = 0;$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \frac{\sin^2 \theta}{1+\sin^2 \theta} \omega t d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \frac{\sin^2}{1+\sin^2} (\theta - \varphi) d\theta = \frac{1}{2\pi} \left(\int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} (\theta - \varphi) d\theta - \right. \\ \left. -\theta - \pi\theta + \pi\theta d\theta 1 + \sin 2\theta + \theta - \pi\theta + \pi\varphi d\theta 1 + \sin 2\theta; \right.$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} (\theta - \varphi) d\theta = \theta - \varphi;$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \frac{\theta d\theta}{1+\sin^2 \theta} = \left[\begin{array}{l} \frac{1}{1+\sin^2 \theta} - \text{четная функция;} \\ \downarrow \\ \frac{1}{1+\sin^2 \theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} + \sum_k A_k \cos k\theta; \end{array} \right] =$$

$$\frac{1}{2\pi} \left[\int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \frac{\theta d\theta}{\sqrt{2\pi}} + \sum_k \frac{A_k}{k^2} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} k\theta \cos k\theta dk \right] = \frac{\theta}{\sqrt{2\pi}};$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \frac{\varphi d\theta}{1+\sin^2 \theta} = \frac{\varphi}{\sqrt{2\pi}};$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \frac{\sin^2 \theta}{1+\sin^2 \theta} \omega t d\theta = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right) (\theta + \pi - \varphi) = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\right) \omega t.$$

Таким образом, усредненные уравнения принимают вид

$$\begin{cases} \dot{A} = -\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) A; \\ \dot{\varphi} = -\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) \omega t; \\ \omega = \frac{4}{A\pi} \end{cases} \quad (3.157)$$

Обозначая $-\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) = p$, выпишем общее решение полученной системы

$$A = C e^{pt}; \quad \omega = \frac{4}{C\pi} e^{-pt}; \quad \varphi = \frac{4}{C\pi p} e^{-pt} (-pt - 1) + C_1, \quad (3.158)$$

где C, C_1 – произвольные постоянные. При этом текущая фаза определяется выражением

$$\theta = \omega t + \varphi = \omega^* t + C_1,$$

где

$$\omega^* = -\frac{4}{C\pi p} \frac{e^{-pt}}{t}, \quad (3.159)$$

ω^* – эквивалентная частота колебаний. Как видно, амплитуда колебаний асимптотически стремится к нулю при $t \rightarrow \infty$, в то время как частота переключения ω^* неограниченно возрастает. Полученный результат полностью переносится на систему (3.150), а, следовательно, и на систему (3.148). Рисунок 3.20 иллюстрирует результаты моделирования системы (3.150).

Таким образом, в данной конкретной ситуации наличие динамических неидеальностей не приводит к возникновению недопустимых автоколебаний, несмотря на то, что имеет место вырожденный случай организации скользящего режима. Тем не менее, сохраняются инвариантные свойства, присущие идеальному скользящему режиму. Так же как и в идеальном случае, попадание на поверхность скольжения происходит за конечное время. Однако тут следует добавить «в среднем», поскольку амплитуда колебаний становится равной нулю не за конечное время, а лишь на бесконечности. В остальном практически нет различий между идеальным скользящим режимом и рассмотренной схемой. Можно сказать, что в системе возникает «псевдоскользящий» режим. Иначе говоря, подобная схема может применяться в качестве эквивалента идеального скользящего режима всякий раз, когда отсутствуют жесткие требования к одновременному выполнению условий точности и длительности попадания на поверхность скольжения.

Аналогичный результат получается в случае, когда динамические неидеальности присутствуют только в канале управления. В этих условиях система (3.150) может быть записана в виде

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v - f; \\ \dot{v} &= u - v; \\ u &= -\text{sign } x. \end{aligned} \tag{3.160}$$

Для невозмущенной системы ($f = 0$) замена переменных приводит к дифференциальным уравнениям относительно новых переменных

$$v = A \cos(\omega t + \varphi); x = \frac{A}{\omega} \sin(\omega t + \varphi); A\omega = \frac{4}{\pi}; \text{sign}(\omega t + \varphi);$$

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{A} &= -A \frac{\cos^2(\omega t + \varphi)}{1 + \sin^2(\omega t + \varphi)}; \\ \dot{\varphi} &= -\frac{1}{2} \frac{\sin 2(\omega t + \varphi)}{1 + \sin^2(\omega t + \varphi)} - \frac{\cos^2(\omega t + \varphi)}{1 + \sin^2(\omega t + \varphi)} \omega t; \\ \omega &= \frac{4}{A\pi} \end{aligned} \right.$$

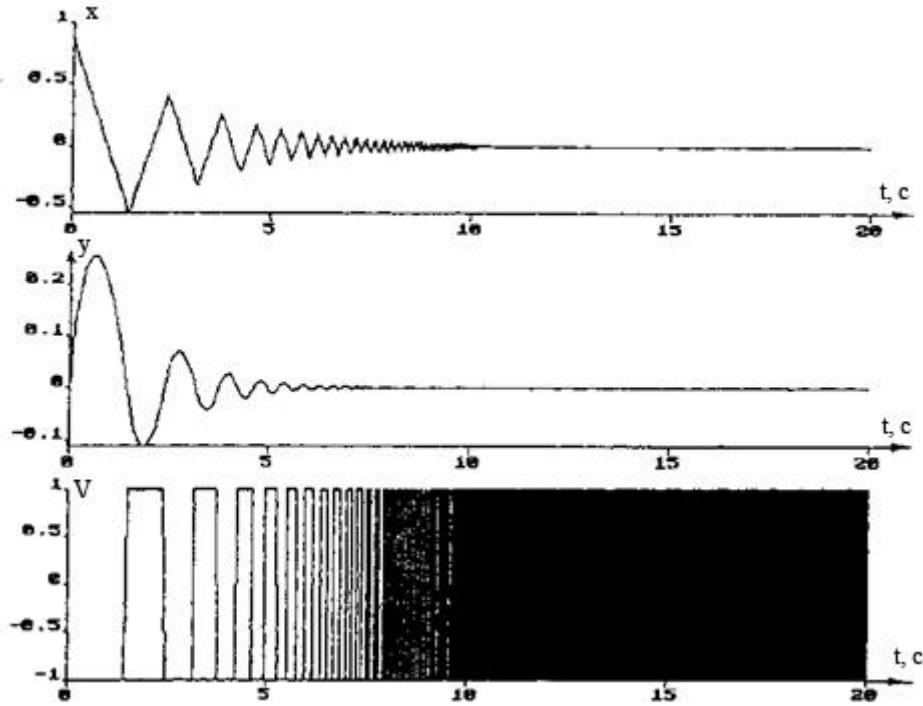


Рисунок 3.20 – Результаты моделирования «псевдоскользящего» режима при наличии динамических неидеальностей в канале измерения

Учитывая

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \frac{\cos^2\theta}{1+\sin^2\theta} d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta-\pi}^{\theta+\pi} \left(-1 + \frac{1}{1+\sin^2\theta}\right) d\theta = \sqrt{2\pi} - 1;$$

и проделывая процедуру усреднения, находим

$$\begin{cases} \dot{A} = -(\sqrt{2} - 1)A; \\ \dot{\varphi} = -(\sqrt{2} - 1)\omega t; \\ \omega = \frac{4}{A\pi} \end{cases} \quad (3.161)$$

Обозначая как и прежде $-(\sqrt{2} - 1)$, получим общее решение системы в виде (3.108). При этом эквивалентная частота колебаний также описывается выражением (3.109). Результаты моделирования системы (3.160) показаны на рисунке 3.21.

Таким образом, как видно, и при наличии динамических неидеальностей в канале управления ситуация почти полностью аналогична случаю, когда неидеальности присутствуют только в канале измерения.

Перенося полученные результаты на задачу регулирования скорости электропривода, заметим, что здесь имеют место оба случая динамических неидеаль-

ностей. Уравнения электропривода в контексте решаемой задачи с учетом (3.107), (3.109), (3.110), (3.104), (3.147) могут быть представлены в виде

$$\begin{cases} \sigma i_s = -R_s i_s - k y + u_s; \\ \dot{\psi}_r = y; \\ \dot{y} = k(-R_s i_s + u_s) - \alpha y + \omega y; \\ M = \frac{3}{2} \psi_r i_s; \\ u_s = \frac{L_s}{L_m} Y \frac{y}{\|y\|} + \frac{\sigma}{k} v y + R_s i_s; \\ \tau \hat{\omega} = v_2 - \hat{\omega}. \end{cases} \quad (3.162)$$

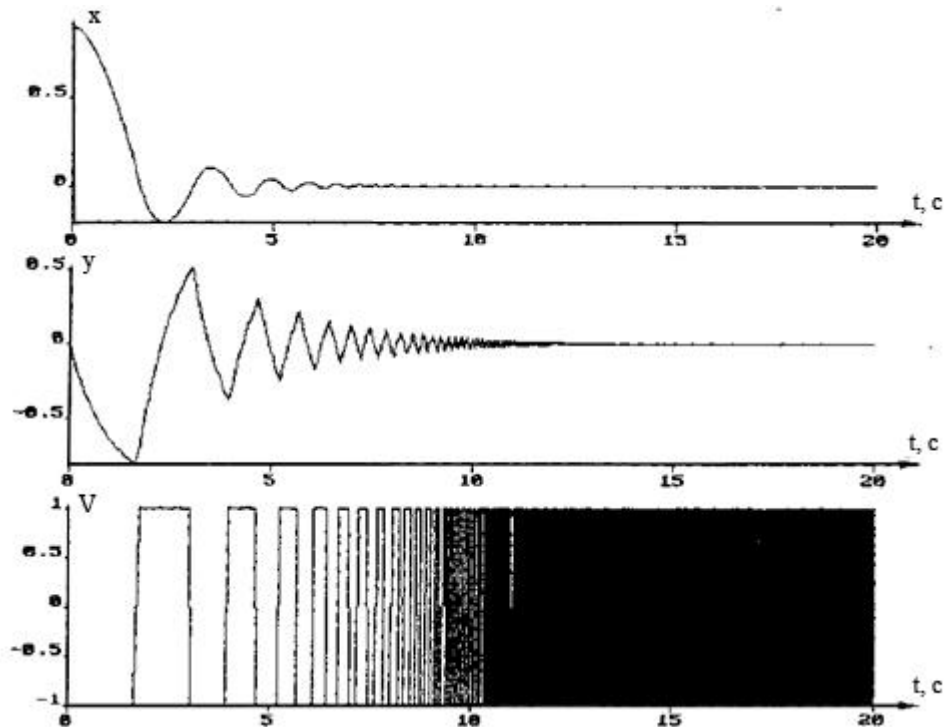


Рисунок 3.21 – Результаты моделирования «псевдоскользящего» режима при наличии динамических неидеальностей в канале управления.

В роли управляющего воздействия выступает напряжение u_s . Динамические неидеальности в канале управления реализуются первым уравнением системы, в канале измерения – последним.

И хотя совместное влияние обоих типов неидеальностей не изучалось, следует отметить, что электромагнитная постоянная времени тока статора, по крайней мере, на порядок меньше электромеханической. Кроме того, параметр может быть выбран произвольно и, как следствие, постоянная времени канала измерения сведена к нулю. Иными словами, неучтенной динамикой в канале измерения можно пренебречь. Остается лишь дополнительная инерционность в канале

управления, а этот случай уже рассмотрен. Неидеальностями типа «чистое запаздывание», которые имеют место в силу задержки распространения сигнала управления в силовом преобразователе, из-за их малости (порядка 1 – 2 мкс) также можно пренебречь.

Управление вида

$$v_s = \frac{L_s}{L_m} Y \frac{y}{\|y\|} + \frac{\sigma}{k} v y + R_s i_s s, \quad (3.163)$$

где

$$v = -V \text{sign}s; s = \omega - \omega_z; V > \left| \frac{2}{3} \frac{J}{\psi^2} (M_c + \dot{\omega}_z) \right|, \quad (3.164)$$

решает задачу регулирования скорости вращения вала двигателя и обеспечивает инвариантность к внешним возмущениям M_c , $\dot{\omega}_z$. Результаты моделирования регулятора скорости приведены на рисунке 3.22.

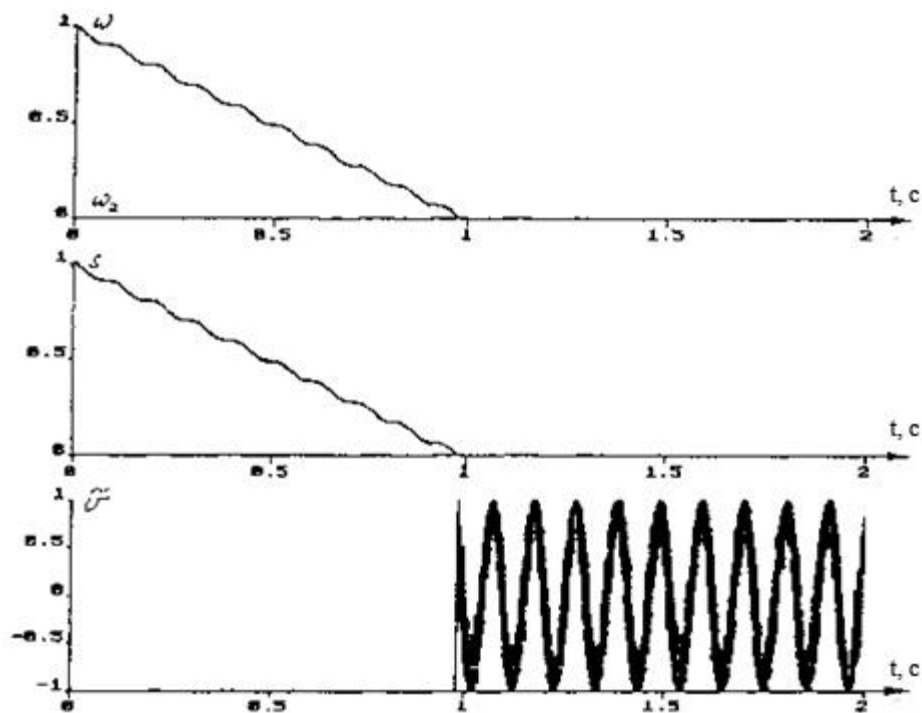


Рисунок 3.22 – Результаты моделирования регулятора скорости вращения вала двигателя

Управление силовым преобразователем в замкнутом контуре регулирования электромагнитных переменных асинхронной машины. Разрывной характер напряжения, питающего асинхронную машину при работе от полупроводникового преобразователя частоты, вынуждает к поиску оптимального соотношения между

частотой коммутации и амплитудой высших гармоник тока статора, характеризуемого минимальными суммарными потерями в двигателе и силовом преобразователе. Дополнительная степень свободы (в трехфазной системе), обусловливаемая избыточностью вектора управления, предоставляет принципиальную возможность для эффективного решения этой задачи, но, в то же время, приводит к неоднозначности в выборе закона коммутации. Как показал проведенный анализ, привлечение для этой цели дополнительного критерия, характеризующего суммарные потери, не устранило, тем не менее, указанной неопределенности. Причина, вероятно, состоит в том, что коммутационные потери в преобразователе, как правило, описываются линейной функцией частоты или числа переключения, в то время как они зависят еще и от величины и распределения тока в обмотках машины. И если потери в двигателе от высших гармоник тока достаточно хорошо выражаются аналитически, то описание потерь на переключение нуждается в уточнении.

Не претендуя на единственность решения, попытаемся более точно определить потери в преобразователе и затем, используя полученное выражение, осуществить синтез алгоритма коммутации силовых элементов. С этой целью рассмотрим процесс коммутации фазы силового преобразователя. Оговоримся сразу, что мы имеем дело с инвертором напряжения, поэтому дальнейшие рассуждения справедливы только для этого типа преобразователей. Типичный вид диаграмм напряжения и тока силового ключа инвертора напряжения при работе на индуктивную нагрузку приведен на рисунке 3.23.

Представление нагрузки преобразователя (фазной обмотки двигателя) в виде индуктивности оправдано тем, что, в предположении непрерывности тока в обмотках машины, на интервале коммутации его можно считать постоянным. В этом случае затраты энергии на переключение в течение периода коммутации могут быть определены следующим образом

$$W_k = \int_{t_0}^{t_0 + \tau_{on}} U_d i_{on} dt + \int_{t_0 + T_k}^{t_0 + T_k + \tau_{off}} U_d i_{off} dt,$$

где U_d – напряжение источника питания;

i_{on}, i_{off} – кривые тока на интервале включения и выключения силового элемента;

τ_{on}, τ_{off} – длительности интервалов включения и выключения;

T_k – период коммутации.

Заметим, что характер изменения тока на интервалах $t \in (t_0, t_0 + \tau_{on})$, $t \in (t_0 + T_k, t_0 + T_k + \tau_{off})$ может быть различным и обуславливаться множеством причин, включая типы используемых полупроводниковых приборов, различные схемные решения и т.д.

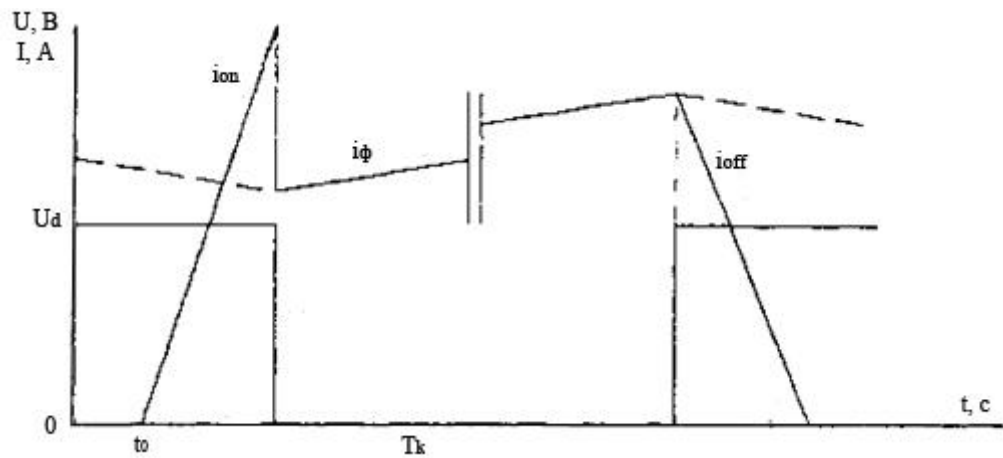


Рисунок 3.23 – Типичные временные диаграммы тока и напряжения силового ключа при работе на индуктивную нагрузку

Однако, в граничных точках, соответствующих на рисунке 3.15 моментам времени $t = t_0, t_0 + \tau_{on}, t_0 + T_k, t_0 + T_k + \tau_{off}$, величина тока силового ключа полностью определяется текущим значением фазного тока двигателя. Полагая ток фазы постоянным на интервале коммутации, можно записать

$$W_k = U_d |i_\phi| \left(\int_{t_0}^{t_0 + \tau_{on}} g_1(t) dt + \int_{t_0 + T_k}^{t_0 + T_k + \tau_{off}} g_2(t) dt \right), \quad (3.165)$$

где $U_d |i_\phi|$ – коммутируемая мощность, а выражение в скобках характеризует потери энергии на переключение при единичных фазном токе и напряжении питания. Значение этого функционала зависит от схемы преобразователя и определяется в каждом конкретном случае отдельно. Представим соотношение (3.165) в виде

$$W_k = U_d |i_\phi| W_1,$$

где W_1 – затраты энергии на коммутацию единичной мощности.

Найдем среднее значение мощности потерь на периоде коммутации. Имеем

$$P_k = U_d |i_\phi| \frac{1}{T_k} W_1. \quad (3.166)$$

Рассмотрим задачу управления силовым преобразователем. Все построения, проведенные ранее, были ориентированы на разделение общей задачи управления системой на две подзадачи меньшей размерности. На первом этапе были найдены соотношения между переменными состояния и задающими воздействиями, определяющие режим работы системы. На данном этапе предполагается обеспечить движение вдоль поверхностей в пространстве состояний системы (3.95), образованных указанными соотношениями за счет организации скользящего режима на их пересечении. Задача синтеза скользящих движений в значительной степени облегчается тем обстоятельством, что регулируемые переменные (компоненты вектора тока статора) являются выходом «быстрой» подсистемы и поэтому все «медленные» компоненты могут считаться постоянными. В этом смысле сингулярность системы (3.95) оказывает дополнительную «услугу» при организации скользящего режима, особенно полезную в случае, когда требуемое значение амплитуды основной гармоники напряжения близко к предельным возможностям преобразователя.

Построим импульсный модулятор напряжения, определяемого в силу соотношения (3.93) как

$$\tilde{u}_s = \frac{L_s}{L_m} Y \frac{y}{\|y\|} + \frac{\sigma}{k} v y + R_s i_s.$$

Имеем

$$\dot{s} = \tilde{u}_s - u_s, \quad (3.167)$$

где s – интегральная ошибка регулирования.

Равенство s нулю означает равенство \tilde{u}_s и u_s «в среднем». В покомпонентной записи, учитывая (3.96), получаем

$$\begin{pmatrix} \dot{s}_\alpha \\ \dot{s}_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{u}_\alpha \\ \tilde{u}_\beta \end{pmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_d}{2} \begin{pmatrix} e_{a\alpha} & e_{b\alpha} & e_{c\alpha} \\ e_{a\beta} & e_{b\beta} & e_{c\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{sign } u_a \\ \text{sign } u_b \\ \text{sign } u_c \end{pmatrix} \quad (3.168)$$

Поставим задачу минимизации потерь в преобразователе при заданной точности регулирования «среднего» напряжения статора. С этой целью употребим

прием, аналогичный используемому в работах. А именно, расширим систему (3.168) добавлением еще одного дифференциального уравнения таким образом, чтобы матрица перед управлением была невырожденной. Например,

$$\begin{pmatrix} \dot{s}_\alpha \\ \dot{s}_\beta \\ \dot{s}_\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{u}_\alpha \\ \tilde{u}_\beta \\ \tilde{u}_\gamma \end{pmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{U_d}{2} \begin{pmatrix} e_{a\alpha} & e_{b\alpha} & e_{c\alpha} \\ e_{a\beta} & e_{b\beta} & e_{c\beta} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{sign } u_a \\ \text{sign } u_b \\ \text{sign } u_c \end{pmatrix} \quad (3.149)$$

В этом случае нулевое значение переменной s_γ фиксирует «среднее» значение \tilde{u}_γ суммы фазных напряжений преобразователя. Вопрос состоит в том, на каком уровне фиксируется это значение? В подавляющем большинстве случаев при ШИМ модуляции или релейном регулировании фазных токов фиксируется как раз нулевое значение \tilde{u}_γ . Между тем, вполне очевидно, что появившуюся дополнительную степень свободы можно использовать для минимизации коммутационных потерь в преобразователе. И совсем не обязательно, что значение \tilde{u}_γ будет, при этом, нулевым.

С этой целью вычислим среднюю частоту переключения в каждой фазе преобразователя. Предположим, что «медленные» переменные принимают постоянное значение на периоде коммутации. При достаточно малом Δ , характеризующем максимальное значение интегральной ошибки регулирования, можно считать эту ошибку линейной функцией времени (рисунок 3.24).

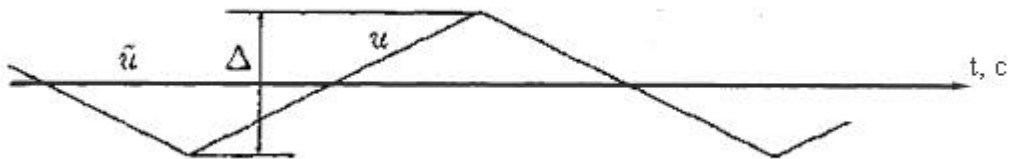


Рисунок 3.24 – Временная диаграмма изменения интегральной ошибки регулирования при импульсной модуляции напряжения

Преобразуя (3.167) к трехфазной системе, получим

$$\begin{pmatrix} \dot{s}_\alpha \\ \dot{s}_\beta \\ \dot{s}_\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{u}_\alpha \\ \tilde{u}_\beta \\ \tilde{u}_\gamma \end{pmatrix} + \frac{U_d}{2} \begin{pmatrix} \text{sign } u_a \\ \text{sign } u_b \\ \text{sign } u_c \end{pmatrix}. \quad (3.170)$$

Учитывая сказанное, найдем отсюда среднее значение периода коммутации в каждой фазе преобразователя (рисунок 3.21)

$$T_i = \tau_{1i} + \tau_{2i} = \frac{2\Delta}{U_d - 2\tilde{u}_i} + \frac{2\Delta}{U_d + 2\tilde{u}_i} = \frac{4\Delta U_d}{U_d^2 - 2\tilde{u}_i^2}.$$

Отсюда средняя частота переключения

$$f_i = \frac{1}{T_i} = \frac{U_d^2 - 4\tilde{u}_i^2}{4\Delta U_d}.$$

Подставляя полученное соотношение для каждой фазы в (3.166), вычислим суммарную мощность коммутационных потерь

$$P_{k\Sigma} = \frac{W_i}{4\Delta} [|i_a| (U_d^2 - 4\tilde{u}_i^2) + |i_b| (U_d^2 - 4\tilde{u}_i^2) + |i_c| (U_d^2 - 4\tilde{u}_i^2)]. \quad (3.171)$$

Заметим, что в скользящем режиме, когда $s_i = 0$, величины u_α , u_β , u_γ в силу (3.169), (3.170) связаны с фазными напряжениями невырожденным преобразованием

$$\begin{pmatrix} \tilde{u}_\alpha \\ \tilde{u}_\beta \\ \tilde{u}_\gamma \end{pmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} e_{a\alpha} & e_{b\alpha} & e_{c\alpha} \\ e_{a\beta} & e_{b\beta} & e_{c\beta} \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{u}_a \\ \tilde{u}_b \\ \tilde{u}_c \end{pmatrix}. \quad (3.172)$$

Отсюда находим

$$\begin{pmatrix} \tilde{u}_a \\ \tilde{u}_b \\ \tilde{u}_c \end{pmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} e_{a\alpha} & e_{a\beta} & \frac{1}{2} \\ e_{b\alpha} & e_{b\beta} & \frac{1}{2} \\ e_{c\alpha} & e_{c\beta} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{u}_\alpha \\ \tilde{u}_\beta \\ \tilde{u}_\gamma \end{pmatrix} \quad (3.173)$$

$$\tilde{u}_a = \tilde{u}_a^* + \frac{1}{\sqrt{6}} \tilde{u}_\gamma;$$

$$\tilde{u}_b = \tilde{u}_b^* + \frac{1}{\sqrt{6}} \tilde{u}_\gamma; \quad (3.174)$$

$$\tilde{u}_c = \tilde{u}_c^* + \frac{1}{\sqrt{6}} \tilde{u}_\gamma,$$

где $\tilde{u}_a^*, \tilde{u}_b^*, \tilde{u}_c^*$ – проекции вектора напряжения на оси симметричной трехфазной системы. Подставляя соотношения (3.174) в (3.171) и проводя необходимые преобразования, получим

$$P_{k\Sigma} = \frac{W_1}{4\Delta} \left[\frac{U_d^2}{4} |i_a| + |i_b| + |i_c| \left(\tilde{u}_a^{*2} + \frac{1}{6} \tilde{u}_\gamma^2 \right) - |i_b| \left(\tilde{u}_b^{*2} + \frac{1}{6} \tilde{u}_\gamma^2 \right) - \right. \\ \left. - icisc*2 + 16i\gamma^2 - 23i\gamma(i_a u_a^* + i_b u_b^* + i_c u_c^*) \right] \quad (3.175)$$

Требуется найти оптимальное значение функции \tilde{u}_γ , доставляющее минимум мощности потерь $P_{k\Sigma}$. Из анализа выражения (3.175) следует, что экстремальное значение достигается только на границе области определения, задаваемой функцией \tilde{u}_γ . В то же время, последнее уравнение в (3.169) показывает, что

$$|\tilde{u}_\gamma| \leq \sqrt{\frac{2}{3}} U_d.$$

Таким образом, функция

$$\tilde{u}_\gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d \text{sign}(|i_a| \tilde{u}_a^* + |i_b| \tilde{u}_b^* + |i_c| \tilde{u}_c^*) = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d \text{sign} \chi, \quad (3.176)$$

где

$$\chi = |i_a| \tilde{u}_a^* + |i_b| \tilde{u}_b^* + |i_c| \tilde{u}_c^*;$$

доставляет минимум значению мощности суммарных коммутационных потерь $P_{k\Sigma}$. В этом случае функция

$$s_\gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} U_d \int_0^t (\text{sign} \chi + \frac{1}{3} (\text{sign} u_a + \text{sign} u_b + \text{sign} u_c)) dt. \quad (3.177)$$

Для синтеза управляющих воздействий воспользуемся свойством инвариантности скользящих движений к линейному преобразованию поверхностей разрыва. С этой целью введем невырожденное преобразование поверхностей $s_1 = 0$, аналогичное (3.173).

Получим

$$\begin{pmatrix} \tilde{u}_a \\ \tilde{u}_b \\ \tilde{u}_c \end{pmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} e_{a\alpha} & e_{a\beta} & \frac{1}{2} \\ e_{b\alpha} & e_{b\beta} & \frac{1}{2} \\ e_{c\alpha} & e_{c\beta} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{s}_\alpha \\ \tilde{s}_\beta \\ \tilde{s}_\gamma \end{pmatrix}. \quad (3.178)$$

Дифференцирование (3.178) в силу системы (3.169) с учетом (3.173) приводит к уравнениям

$$\begin{pmatrix} \dot{s}_\alpha \\ \dot{s}_\beta \\ \dot{s}_\gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{u}_a \\ \tilde{u}_b \\ \tilde{u}_c \end{pmatrix} + \frac{U_d}{2} \begin{pmatrix} \text{sign } u_a \\ \text{sign } u_b \\ \text{sign } u_c \end{pmatrix}. \quad (3.179)$$

Управляющие воздействия вида

$$\text{sign } u_a = -\text{sign } s_a, \text{sign } u_b = -\text{sign } s_b, \text{sign } u_c = -\text{sign } s_c \quad (3.180)$$

при условии

$$|\tilde{u}_a| < \frac{U_d}{2}; |\tilde{u}_b| < \frac{U_d}{2}; |\tilde{u}_c| < \frac{U_d}{2} \quad (3.181)$$

приводят к возникновению скользящего режима на пересечении поверхностей $s_{a,b,c} = 0$ и, соответственно, $s_{\alpha,\beta,\gamma} = 0$.

Использование релейных элементов с характеристикой типа «гистерезис» для формирования управляющих воздействий дает возможность подбором величины гистерезиса установить максимальное значение интегральной ошибки регулирования.

Результаты сравнительного моделирования алгоритма управления силовым преобразователем с минимизацией коммутационных потерь приведены на рисунке 3.26.

Рисунок 3.25 иллюстрирует работу преобразователя без минимизации потерь. В этом случае параметр $\mu = 0$ и алгоритм управления реализует равенство нулю суммы фазных напряжений преобразователя «в среднем». Оценка затрат энергии на коммутацию осуществлялась по формуле

$$W_k = \frac{1}{T} \int_0^t \sum_i |U_d i_i \delta(u_i)| d\tau,$$

где функция $\delta(u_i)$ образует единичный импульс фиксированной длительности (1 мкс), возникающий в моменты переключения соответствующих фазных напряжений.

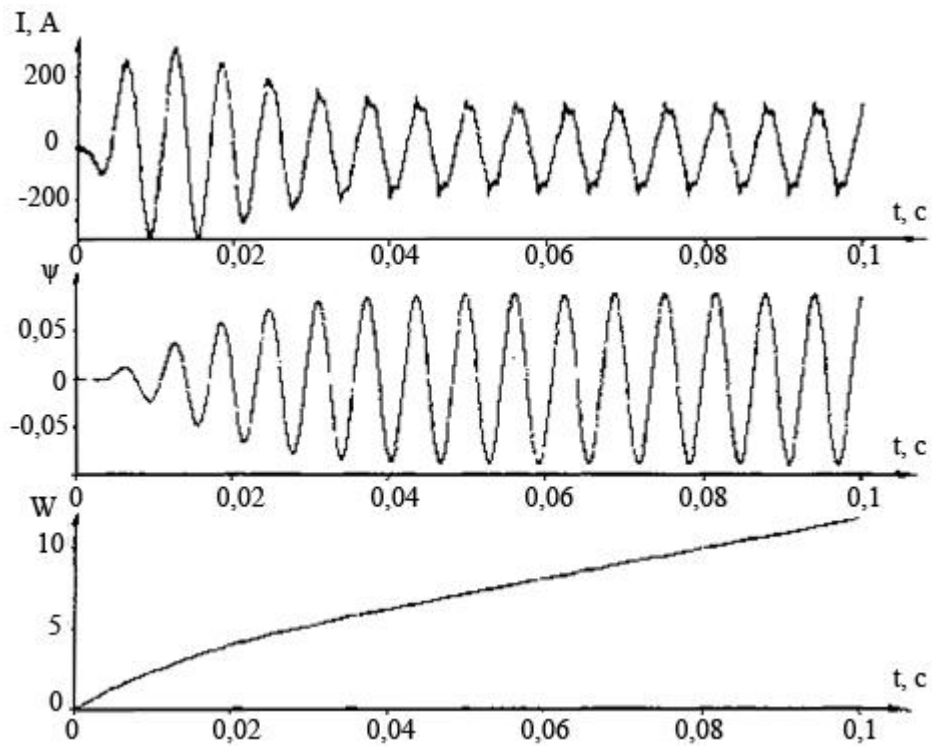


Рисунок 3.25 – Результаты моделирования преобразователя без минимизации потерь

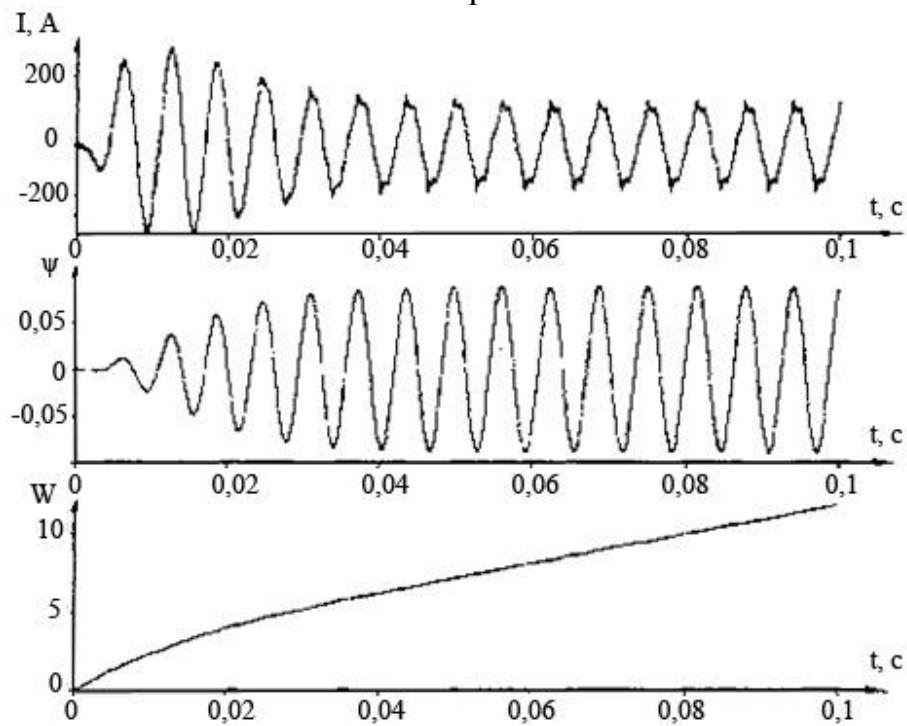


Рисунок 3.26 – Результаты моделирования преобразователя с минимизацией потерь

3.5 Выводы по главе

Специфика организации работы тяговой системы электромобиля или автомобиля с КЭУ требует проведения исследований в области рационализации управления энергопреобразованием. В работе, на основе исследования взаимосвязей процессов и закономерностей в ТСЭ, проведена разработка эффективных средств обеспечения требуемых параметров эксплуатации автономных электроприводов ЭМБ и АКЭУ.

В данной главе решены задачи по обеспечению управления электрическими машинами в тяговых приводах ЭМБ и АКЭУ, специфическими особенностями которых являются жесткие требования, предъявляемые к массогабаритным и энергетическим показателям электропривода в целом и электрической машины в частности. Машины, используемые в приводах, как правило, высокооборотные, т.е. спроектированы на повышенные частоты (до 400...500 Гц) и предполагают глубокое регулирование магнитного потока. В связи с этим, в системах тягового привода целесообразно выделять два контура регулирования – внешний контур регулирования скорости и внутренний (подчиненный) контур регулирования токов.

Решена задача предельного использования электрической машины по мощности во всем диапазоне возможных скоростей и нагрузок с минимально возможным для каждого режима работы (т.е. для текущих значений частоты вращения и момента) потерями в машине и с учетом ограничений, налагаемых на максимальные значения фазного напряжения и тока, а также мощности, потребляемой от источника энергии.

ГЛАВА 4. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ С АКЭУ

4.1 Проблема разработки системы регулирования скорости движения АКЭУ

В настоящее время, перспективы развития автомобилестроения во многом определяются показателями качества и надежности функционирования автомобилей. Автопроизводители неизменно повышают технические характеристики продукции с учетом известных ограничений в области безопасности и охраны окружающей среды [165].

Качество функционирования автомобиля с комбинированной энергоустановкой (АКЭУ) определяется рядом технических параметров, существенная часть из которых обеспечивает эффективность работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Потребитель в Западной Европе весьма требователен к вопросам топливной экономичности и вредным выбросам. Но при этом автомобиль не должен терять динамические характеристики и гарантировать высокий уровень комфорта.

Сегодня мы наблюдаем бурное развитие систем электроники и автоматики на транспорте. Главным образом, современные автомобили иностранного производства, активно насыщаются комплексами обеспечения эффективности движения и безопасности. В этой части мы наблюдаем определенное отставание наших ведущих автопроизводителей. Между тем разработка и внедрение электротехнических и электронных комплексов обеспечения эффективности эксплуатации для перспективных АТС является ключевой задачей, решение которой позволит улучшить показатели автономности, безопасности и комфорта эксплуатации ЭМБ и АКЭУ.

Именно поэтому в четвертой главе диссертации проводится разработка и реализация комплекса математических имитационных компьютерных моделей определяющих работу перспективных электронных систем ДВС АКЭУ [140, 151, 161, 165, 166]:

- система регулирования скорости движения автомобиля;

- система изменения фаз газораспределения;
- система «Старт – Стоп».

4.2 Имитационная модель системы регулирования скорости

Общие положения о системе регулирования скорости [140]. Система регулирования скорости определяет механизм управления дроссельной заслонкой в режимах поддержания и ограничения скорости. Сущность реализации соответствующей системы заключается в том, чтобы регулировать угол открытия дроссельной заслонки, и тем самым изменять величину наполнения воздухом в цилиндрах двигателя, что позволяет менять крутящий момент двигателя и как следствие осуществлять регулирование скорости транспортного средства. При этом происходит имитация действий водителя при нажатии педали акселератора.

В режиме поддержания скорости система осуществляет регулирование открытия дроссельной заслонки и частоты вращения коленчатого вала для поддержания заданной скорости движения на ровном участке дороги. При езде на подъеме происходит открытие заслонки на некоторую величину, для достижения заданной скорости. При движении на спуск система прикрывает дроссельную заслонку, чтобы избежать чрезмерного ускорения. Помимо этого существуют подсистемы, отвечающие за безопасность и ограничивающие пределы регулирования. У водителя имеется возможность осуществить обгон, а после вернуться к заданной скорости. Система, также позволяет водителю произвести переключение передачи и автоматически продолжить движение с заданной скоростью.

В режиме ограничения скорости система активна, но осуществляет регулирование скорости только при достижении заданного порога ограничения. При достижении порога скорости, при не полном нажатии на педаль акселератора, система поддержания скорости перехватывает управление дроссельной заслонкой. При отпускании педали скорость снижается и уже не поддерживается функцией регулирования.

Процесс регулирования скорости базируется на нескольких основных функциях, отвечающих за быстроту и плавность движения. В составе системы регулирования присутствуют подсистемы, которые отвечают за управление и безопасность [165]. При структурировании модели регулирования скорости необходимо учесть обязательные компоненты обеспечивающие полноту реализации процесса: фильтр скорости второго порядка; компоненты определения режима регулирования и управления уставкой и типом функции регулирования; компонент управления ускорением и замедлением автомобиля; компонент регулирования положения дроссельной заслонки; интегрирующее звено; компонент приостановки процесса регулирования скорости при изменении номера передачи трансмиссии; компонент расчета длительности отклонения от заданной скорости; компонент деактивации при резком изменении ускорения и реакции на ускорение.

Фильтр скорости второго порядка. Фильтр позволяет выполнить сглаживание входного сигнала скорости, и тем самым осуществляет плавную регулировку выходного коэффициента, определяющего процент открытия дроссельной заслонки, за счет чего устраняются хлопки и резкие изменения положения дросселя, обеспечивается плавная регулировка скорости транспортного средства. Для регулирования скорости движения автомобиля наиболее подходящим является все пропускающий фильтр второго порядка, имитационная математическая модель которого, выполненная в среде Matlab Simulink, представлена на рисунке 4.1.

К входу фильтра (рисунок 4.1) подключен источник входного сигнала единичного ступенчатого импульса Step signal.

Константы C_1 , C_2 , C_3 определяют работу фильтра и выбираются из соотношений:

$$C_4 = C_1 + C_2 + C_3, \quad (4.1)$$

$$C_4 = 1, \quad (4.2)$$

$$C_1 = C_2 = 1/20. \quad (4.3)$$

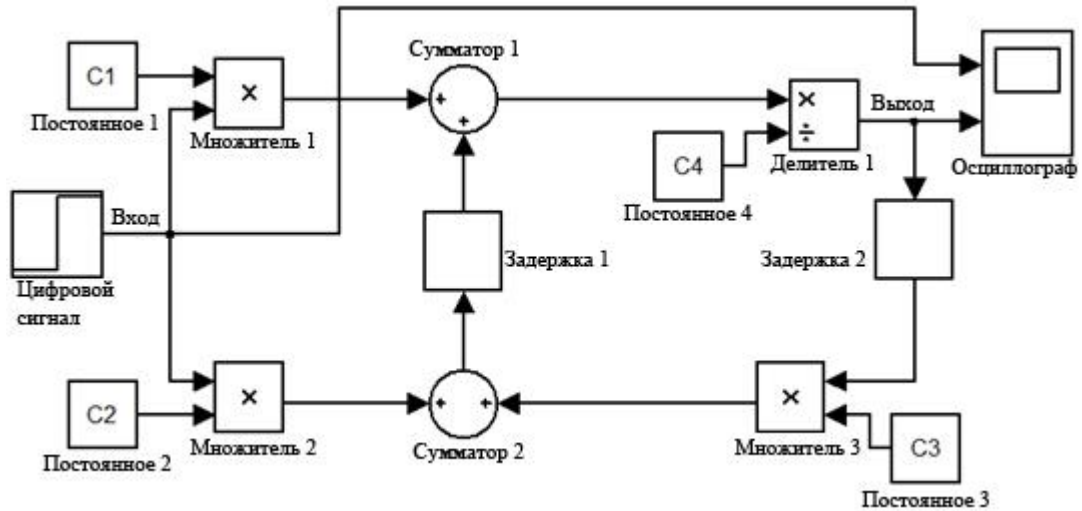
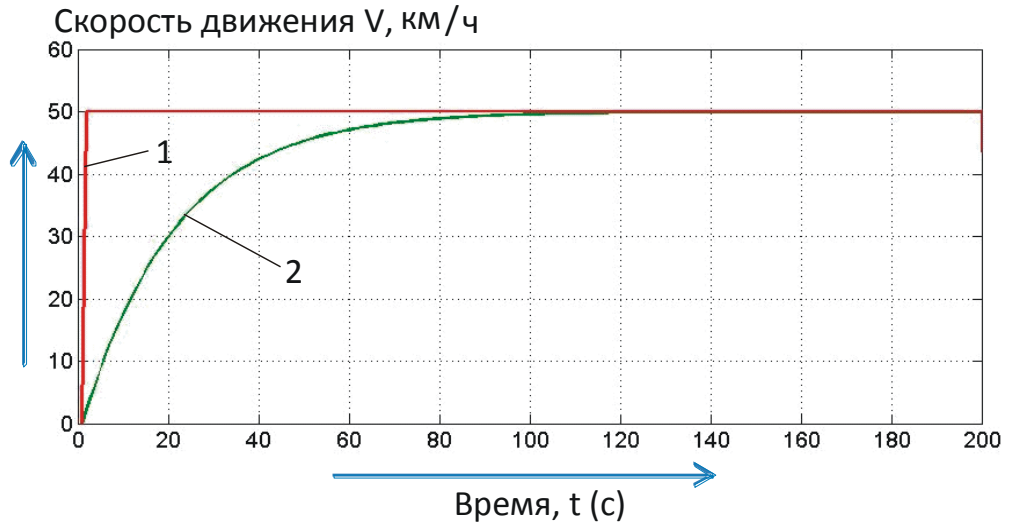


Рисунок 4.1 – Имитационная математическая модель фильтра скорости второго порядка

При разработке математической имитационной модели регулятора скорости использовалась бинарная система исчисления, при этом все переменные представляют собой восьми и шестнадцати битные числа. Таким образом, за единицу принимается максимальное значение восьми или шестнадцати бит, т.е. 255 или 65535.

На вход фильтра подается импульс с амплитудой равной 50 км/ч, что позволяет имитировать изменение скорости (рисунок 4.2). В реальных условиях скорость не может измениться скачком из-за инерции транспортного средства. При изменении шага дискретизации, опытным путем определяем оптимальную частоту цикла дискретизации на уровне 100 мс.

Определение режима регулирования. С учетом того, что в процессе движения автомобиля возникают условия скоростной неравномерности, изменения динамических характеристик и нагрузки, процесс регулирования скорости должен осуществляться в соответствии с текущим состоянием движения. Поэтому существует три режима работы системы регулирования скорости: режим регулирования при постоянном движении; режим регулирования во время ускорения (спуск с горы); режим регулирования во время замедления (подъем в гору).



1 – входной ступенчатый импульс скорости; 2 – значение скорости на выходе фильтра.

Рисунок 4.2 – График фильтрации скорости автомобиля, промоделированный в среде Matlab

Иллюстрацией выбора режима регулирования является график рисунка 4.3, на котором представлены зависимости дифференциальной скорости ($VS_{diffraw}$) от ее предварительного значения.

Режим постоянного движения расположен в пределах

$$C_{VSdiffneg}(\text{замедление}) < VS_{diffraw} < C_{VSdiffpos}(\text{ускорение}). \quad (4.4)$$

Константы $C_{VSdiffneg}$ и $C_{VSdiffpos}$ определяют пределы, при которых считается, что автомобиль движется с постоянной скоростью, ускоряется или замедляется. Значения констант принимаются равными

$$C_{VSdiffneg}(\text{замедление}) = -2\text{км/ч};$$

$$C_{VSdiffpos}(\text{ускорение}) = +2\text{км/ч}.$$

В постоянном режиме движения происходит регулировка угла открытия дроссельной заслонки в небольших пределах. Величина добавки при отклонении скорости и изменении числа оборотов в данном режиме не большая. В этом режиме предполагается равномерное движение автомобиля по ровной поверхности в пределах отклонения скорости, ограничиваемом калибровочными константами.

В режиме ускорения или замедления осуществляется быстрое регулирование скорости. Величина открытия дроссельной заслонки зависит от следующих

факторов: отклонение скорости от уставки; изменение оборотов двигателя; градиент ускорения; номер передачи коробки переключения передач (КПП) и ее тип.

Уставка скорости определяет величину скорости, которую необходимо поддерживать в режиме поддержания и которую следует ограничивать в режиме ограничителя. Уставка хранится в памяти микроконтроллера на протяжении работы функции.

Характеристикой режима является то, что регулирование скорости происходит быстро, но вместе с тем плавно.

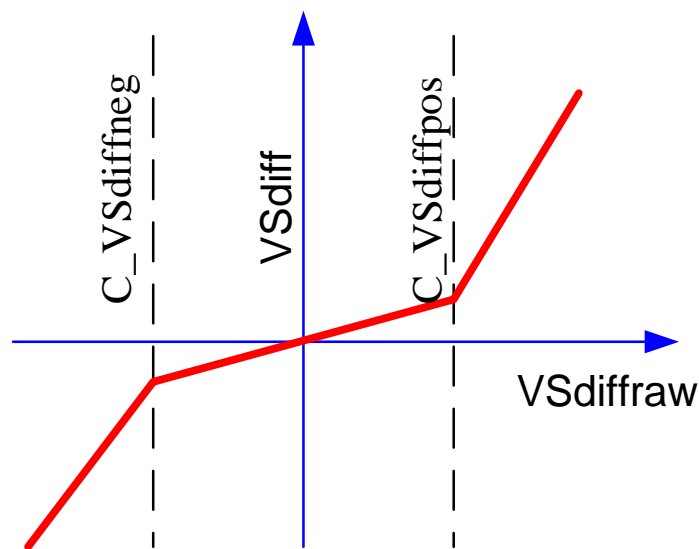


Рисунок 4.3 – Определение режима регулирования скорости

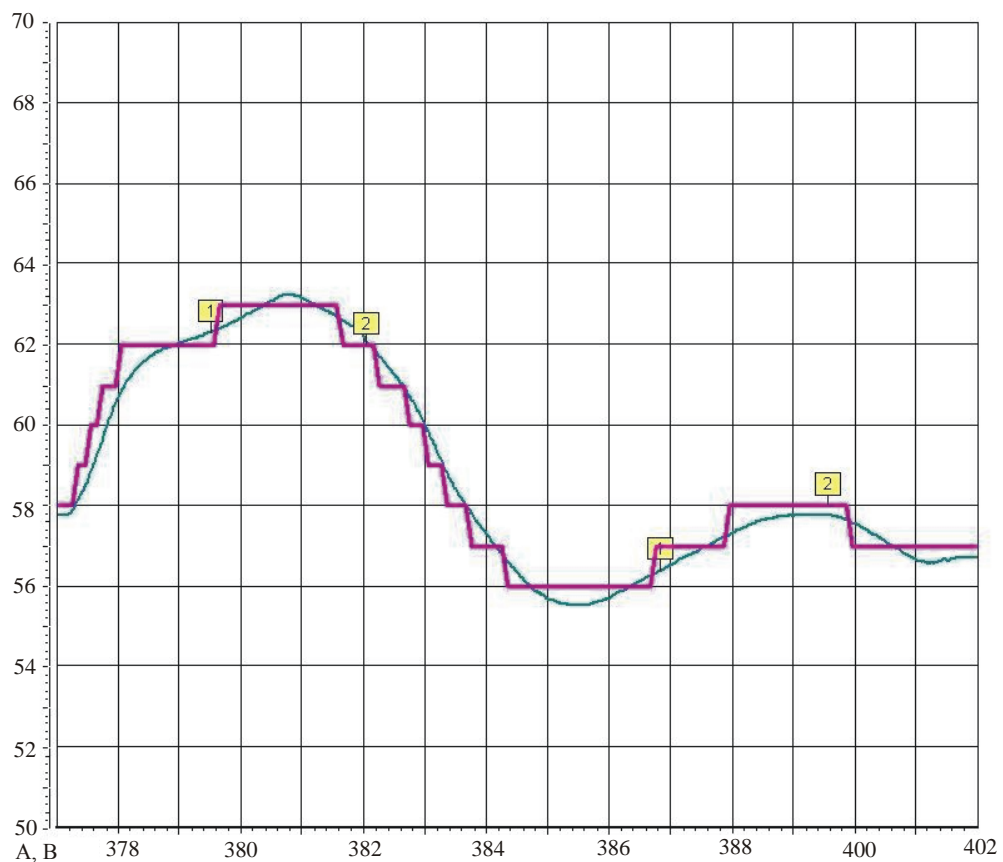
При переходе от одного режима движения к другому меняются коэффициенты регулирования дроссельной заслонкой, при этом исключаются ее хлопки, и дребезг, приводящие к заклиниванию или износу.

Для всех трех режимов имеется один общий параметр, называемый уставкой скорости.

Управление уставкой и типом функции регулирования. Уставка VSP_{const} (Vehicle setpoint const) является целевым параметром для поддержания скорости транспортного средства, а уставка $VSPlimit$ (Vehicle setpoint limit) служит для ее ограничения. Обе уставки имеют размерность соответствующую значению скорости автомобиля после прохождения фильтра скорости второго порядка. Значение

параметра скорости в функции времени движения после прохождения фильтра отстает от реальной величины скорости автомобиля (рисунок 4.4).

Процесс выбора алгоритма регулирования (рисунок 4.5) осуществляется в зависимости от соотношения параметров поддержания и предела скорости и реализуется через управляющий бит B_cl (constant or limitation – постоянное или ограничивающее). По умолчанию выбирается процесс поддержания заданной скорости [151].



1 – фильтрованное значение скорости, км/ч (шкала А); 2 – значение скорости, получаемое от датчика скорости, км/ч (шкала В)

Рисунок 4.4 – Процесс фильтрации параметра скорости автомобиля в функции времени (с.), получаемой с дискретностью в 1 км/ч

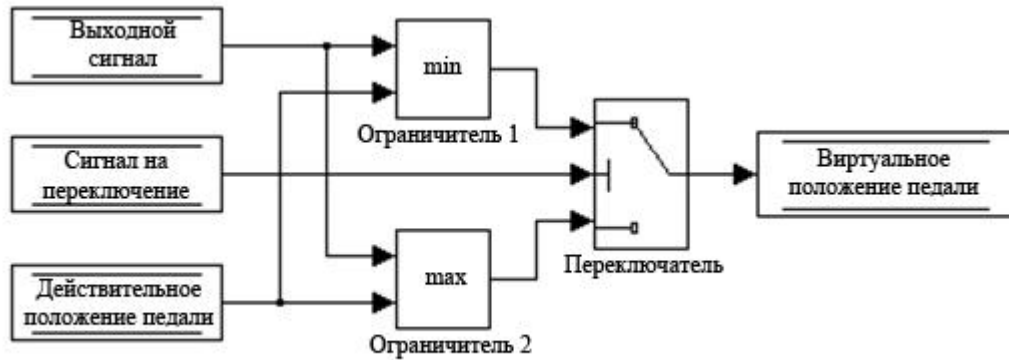
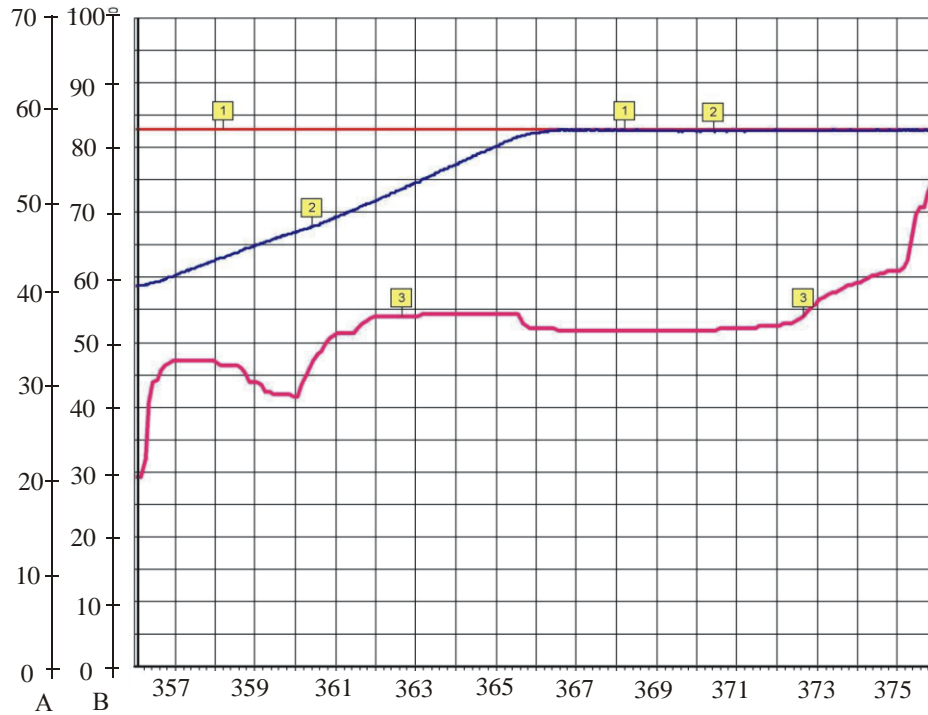


Рисунок 4.5 – Имитационная математическая модель выбора типа функции регулирования

Для данного случая соответствует нижнее положение переключателя (рисунок 4.5). При выбранном, но не активном процессе поддержания скорости величина «Выходной сигнал» QScout (Quantify Control out) равняется нулю, а величина положения педали, зависящая от водителя, передается в основную модель управления электронной педалью в виде сигнала «Действительное положение педали» QSpedalN (Quantify Control of pedal demand), которая в последствии определяет угол открытия дроссельной заслонки.

В случае если функция ограничения скорости выбрана и активна, то переключатель (рисунок 4.5) находится в верхнем положении и регулировка дроссельной заслонки осуществляется исходя из условий минимума. При достижении заданной скорости автомобиля будет осуществляться перехват управления процессом регулирования скорости, и происходит стабилизация по заданному пределу скорости в функции времени (рисунок 4.6).



1 – уставка VSPlimit скорости, км/ч (шкала А); 2 – кривая реальной скорости автомобиля, км/ч (шкала А); 3 – величина нажатия на электронную педаль акселератора, % (шкала В)

Рисунок 4.6 – Регулирование скорости в режиме ограничения

Запись уставки скорости и активация функции в режиме поддержания скорости [161, 165]. Для режима поддержания скорости запись уставки и активация производится копированием текущего значения скорости в ячейку памяти, в которой она впоследствии хранится на протяжении времени работы процесса. При этом обязательно производится инициализация компонента интегратора начальными значениями, соответствующими текущему углу открытия дроссельной заслонки. В момент активации разрешается работа базовой функции ПИ регулирования положения дроссельной заслонки, в переменную QSpedalN (рисунок 4.5) попадает значение, соответствующее текущей величине нажатия на педаль акселератора.

Запись уставки скорости и активация функции в режиме ограничения скорости. Для режима ограничения скорости нет необходимости производить инициализацию интегратора, поскольку активация может производиться как на неподвижном, так и на движущемся автомобиле. Инициализация интегратора может привести к ложному открытию дроссельной заслонки, что приведет к броску обо-

ротов двигателя. При этом производится копирование уставки скорости из памяти постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) в переменную VSP_{limit} и последующая активация функции путем включения разрешающего бита базовой функции поддержания скорости.

Прибавление и убавление уставки. При добавлении уставки производится добавление числового значения одновременно к двум переменным. Первая отвечает за текущее значение уставки, а вторая хранится для режима восстановления скорости из памяти микроконтроллера. Переменные имеют одинаковую размерность. В текущий момент времени, они определяются как целевые VSP_{limit} и VSP_{const} , а те, что хранятся в памяти для режима восстановления заданного значения скорости, называются референсные VSP_{limit0} и VSP_{const0} (через ПЗУ или флеш карту).

Для обеспечения плавной регулировки скорости на момент добавления уставки необходимо осуществлять фильтрацию значения уставки скорости фильтром второго порядка для случаев, когда величина добавки составляет более чем 3 км/ч. В противном случае резкая добавка приведет к резкому ускорению и не комфортным ощущениям водителя.

Процесс пошагового добавления уставки осуществляется прибавлением числа к текущему целевому значению, а затем копированием этого значения в референсную переменную. При этом максимальное и минимальное возможное значение уставки ограничивается калибровочными константами и должны быть целыми положительными числами.

Убавка уставки осуществляется отниманием калибруемой константы от переменных VSP_{limit} и VSP_{const} , и одновременным копированием значений в референсные переменные VSP_{limit0} и VSP_{const0} .

На рисунке 4.7 показан процесс добавления уставки скорости на движущемся АКЭУ в режиме поддержания скорости, в функции времени. При увеличении или уменьшении уставки на некоторую величину, функция регулирования меняет положение дроссельной заслонки, что приводит к изменению количества воздуха

в цилиндрах и в последующем увеличению или уменьшению оборотов двигателя и как следствие скорости АТС.

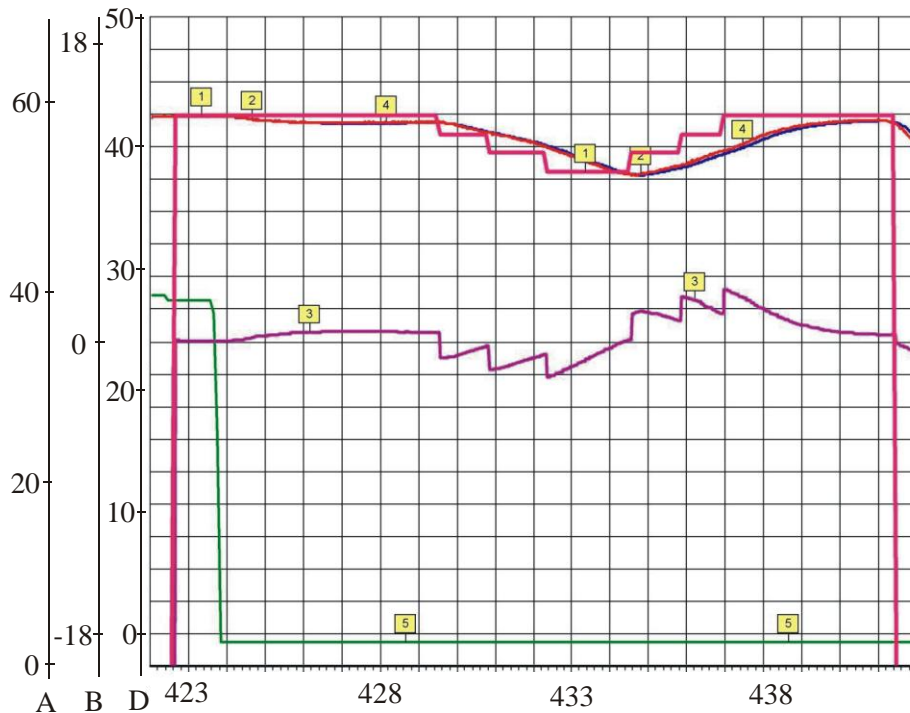


Рисунок 4.7 – Режим поддержания скорости в функции времени.

Изменение уставки скорости автомобиля (согласно рисунку 4.7):

- 1 – величина уставки для режима поддержания скорости, км/ч (шкала А);
- 2 – кривая реальной скорости автомобиля, км/ч (шкала D);
- 3 – дифференциальная скорость автомобиля, км/ч (величина рассогласования скорости, шкала В);
- 4 – фильтрованная скорость, км/ч (шкала D);
- 5 – процент нажатия на педаль, % (шкала D).

Управление ускорением и замедлением АКЭУ. В случае если необходимо увеличить или уменьшить скорость автомобиля относительно действующей уставки используют функцию ускорения и замедления. Процесс изменения скорости может достигаться различными способами. Первый способ путем воздействия на уставку. Второй – путем изменения угла открытия дроссельной заслонки. Отличие данных методов заключается в том, что при непосредственном воздействии на дроссельную заслонку скорость АТС изменяется, в зависимости от желания

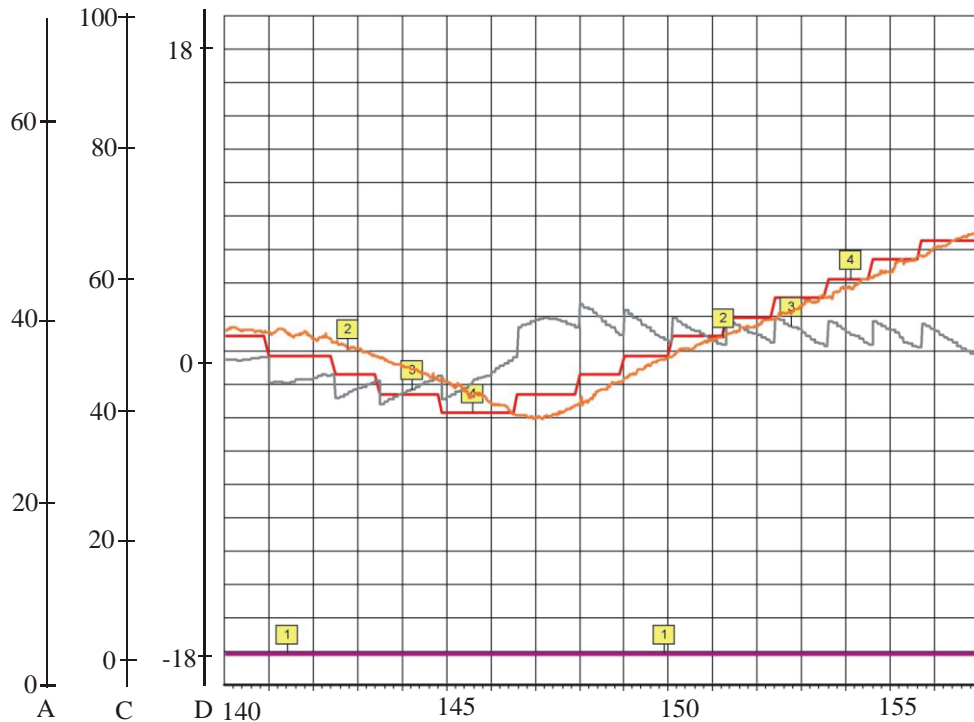
водителя. Данный метод применяется, но его использование сопряжено с рядом проблем, в числе которых безопасность работы процесса регулирования скорости и вероятность выхода из строя механизма управления дроссельной заслонкой [161]. В свою очередь реализация метода увеличения скорости за счет воздействия на уставку занимает больше времени, но при этом является безопасным, так как не требует введение новых связей отвечающих за базовые функции безопасности системы управления двигателем. Повышение скорости за счет повышения уставки может достигаться различными способами. Здесь возможно линейное и нелинейное изменение уставки.

На рисунке 4.8 показан процесс ускорения и замедления АКЭУ в функции времени путем воздействия на уставку скорости.

Интегрирующее звено. При регулировании скорости движения транспортного средства в составе функции поддержания и ограничения скорости присутствует интегратор. Интегратор является общим компонентом для трех режимов регулирования: постоянного, при ускорении и при замедлении. Имитационная математическая модель интегратора представлена на рисунке 4.9.

На вход интегратора попадает величина «Изменение скорости» V_{Sdiff} и табличный коэффициент «N – интегратор» $FacIntegr$ (корректирующий коэффициент интегратора) зависящий от числа оборотов двигателя. После перемножения данных коэффициентов производится проверка условия разрешения работы интегратора «En – интегратор» (Enable of Integrator – разрешение сигнала работы интегратора, запуск основного алгоритма поддержания работы дроссельной заслонки). Если условие выполняется, то в интегратор попадает значение перемноженных коэффициентов, но если это условие не выполняется, то в нем находится величина инициализации «Результирующая скорость» $ResV$ (Reset Value – уровень сигнала инициализации интегратора). Данный прием необходим для того, чтобы на момент активации функции в ней уже было значение соответствующее реальному положению дроссельной заслонки. На следующем этапе происходит ограничение выходной величины интегратора максимальным значением $MaxIntegr$

(максимальная граница интегрирования) и минимальным значением MinIntegr (минимальная граница интегрирования) предела управления [165].



1 – процент нажатия на педаль, % (шкала C); 2 – текущая скорость автомобиля, км/ч (шкала C); 3 – дифференциальная скорость, км/ч (шкала D); 4 – уставка для поддержания скорости, км/ч (шкала A)

Рисунок 4.8 – Ускорение и замедление автомобиля в функции времени за счет изменения уставки скорости

Значение с выхода интегратора суммируется с пропорциональной составляющей, и в результате получается величина Q_{Cout} «Выходной сигнал интегратора», определяющая величину регулирующего воздействия на виртуальную педаль.

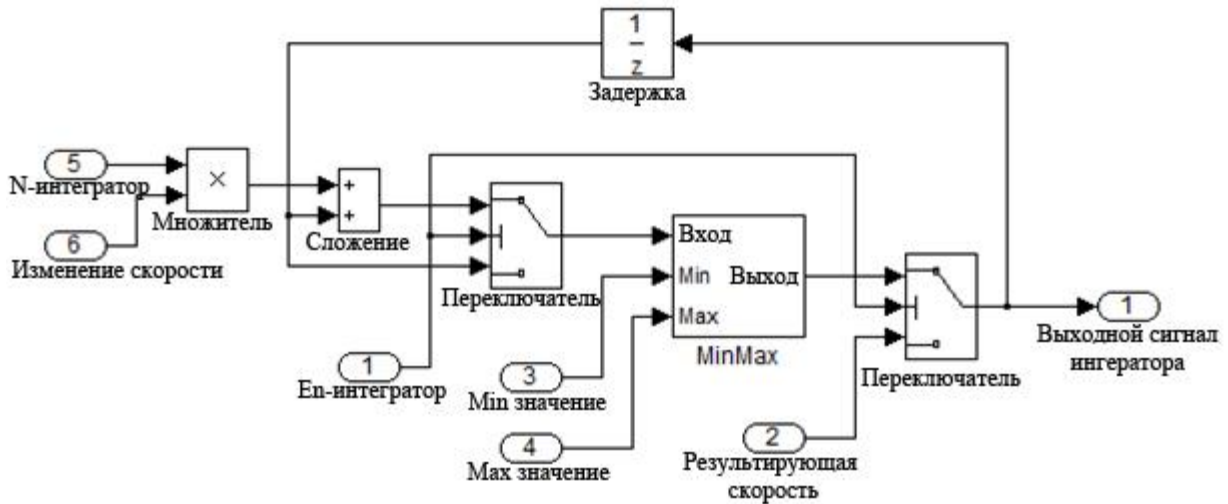


Рисунок 4.9 – Интегрирующий компонент

Базовый компонент регулирования положения дроссельной заслонки [151]. Предварительно в составе базовой функции регулирования необходимо рассчитать величину рассогласования уставки выбранной скорости и величины параметра скорости после прохождения фильтра второго порядка (рисунок 4.10).

Величина рассогласования определяется разницей между фильтрованной скоростью и уставкой. Данное значение рассогласования является не точным, предварительным и в последующем будет скорректировано при помощи регулировочных констант.



Рисунок 4.10 – Расчет рассогласования скорости и уставки

После определения рассогласования скорости и уставки происходит процесс регулирования. В соответствие с этим, выбирается одна или несколько элементов модели рисунка 4.10. При переходе в подмодель проводится пересчет значения «Измененная скорость» (VS_{diff}). При этом с помощью констант «Установочное значение 1» ($C_{VS_{diff_fac}}$) и «Установочное значение 2» ($C_{VS_{diff}}$) осуществляется пересчет значения «Скорость транспортного средства» ($VS_{diffraw}$) для трех режимов движения:

- 1 режим постоянного движения

$$VS_{diff} = VS_{diffraw} \times C_{VS_{diff_fac}}; \quad (4.5)$$

- 2 режим ускорения

$$VS_{diff} = VS_{diffraw} \times C_{VS_{diff_fac}} + C_{VS_{diff}}; \quad (4.6)$$

- 3 режим замедления

$$VS_{diff} = VS_{diffraw} \times C_{VS_{diff_fac}} - C_{VS_{diff}}. \quad (4.7)$$

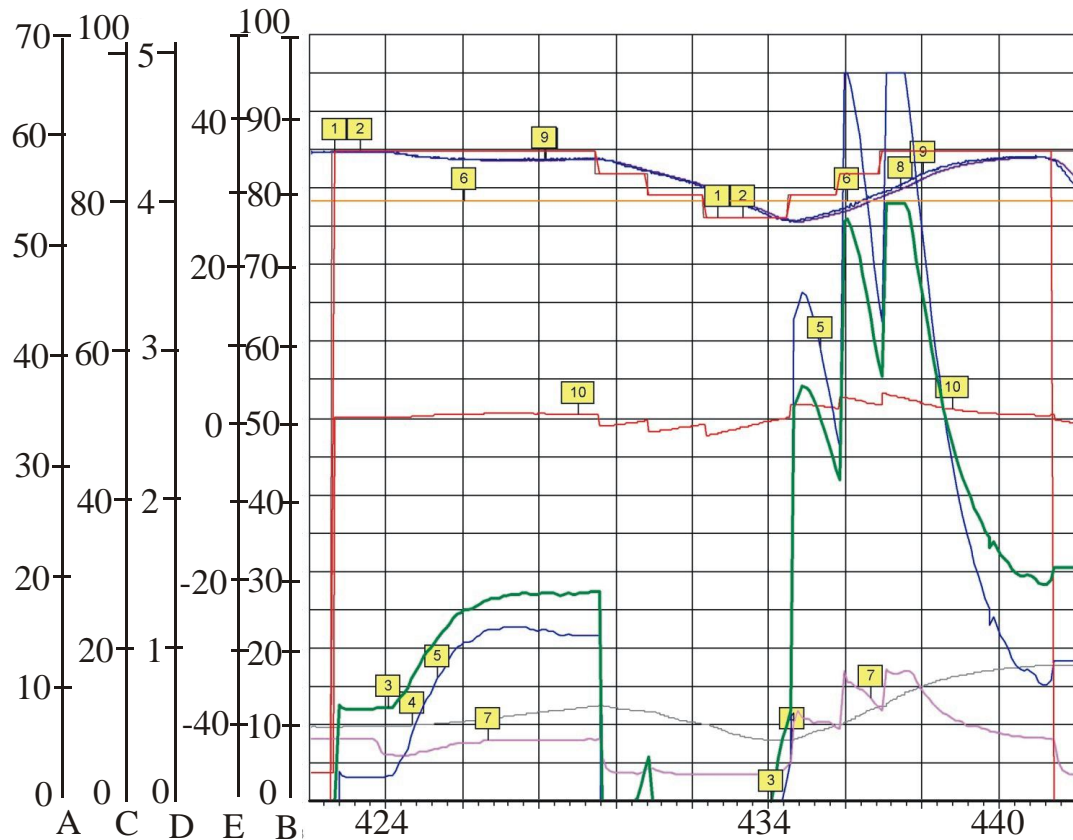
В составе базового компонента ПИ регулирования имеется функция инициализация интегратора, которая позволяет принимать начальное значение в соответствии с типом коробки переключения передач (механическая, автоматическая, или роботизированная). Тип КПП определяется переменной *Typegear*.

Таким образом, определяющими факторами в инициализации интегратора являются: тип КПП, текущий номер передачи (отношение оборотов к скорости) и частота оборотов ДВС. После инициализации компонент выполняет основные действия по регулированию скорости (рисунки 4.11, 4.12).

На рисунках 4.11, 4.12 и 4.13 номера характеристик и определяющих их шкал соответствуют, поэтому приведем необходимое описание один раз, под рисунком 4.11.

Функция приостановки регулирования скорости на момент изменения номера передачи трансмиссии. При изменении переключения передачи необходима временная деактивация функции с последующим возобновлением. Данная необходимость возникает из-за того, что на момент отсоединения диска сцепления

происходит неверное определение номера передачи, что может привести к тому, что функция произвольно деактивируется.



1 – уставка для поддержания скорости, км/ч (шкала A); 2 – референсная уставка поддержания скорости, км/ч (шкала D); 3 – величина результирующего регулирующего воздействия, % (имитация нажатия на педаль акселератора, шкала C); 4 – значение на выходе интегральной составляющей регулирующего воздействия, (шкала C); 5 – значение на выходе пропорциональной части регулирующего воздействия (шкала C); 6 – номер передачи (дес, шкала D); 7 – величина открытия дроссельной заслонки, % (шкала B); 8 – фильтрованная скорость, км/ч (шкала C); 9 – реальная скорость, км/ч (шкала B); 10 – величина рассогласования уставки и скорости, км/ч (шкала E).

Рисунок 4.11 – Регулирование в режиме поддержания скорости

Процесс регулирования скорости в режиме ограничения скорости показан на рисунке 4.12.

Также это может привести к тому, что в момент переключения передачи КПП дроссельная заслонка полностью откроется, и резко возрастут обороты двигателя. Поэтому в момент переключения передачи КПП в модели производятся действия: удаляется уставка из памяти переменной `VSPconst` или `VSPlimit`, но остается храниться в переменной `VSPlimit0` и `VSPconst0`; запускается таймер для

определения длительности переключения передачи. Если значение таймера достигло калибруемой константы $C_timGear$ (время переключения передачи КПП), то функция деактивируется. После отпускания педали сцепления производится запуск другого таймера, который считает в сторону уменьшения от калибруемого значения $C_timClutch$ (время синхронизации работы системы сцепления и ДВС), после которого производится сравнение номера передачи и принятие решения о деактивации функции или не деактивации. В момент, когда педаль сцепления отпущена, производится возврат уставки из памяти переменных $VSPlimit0$ и $VSPconst0$ в память переменных $VSPlimit$ и $VSPconst$ [140, 151].

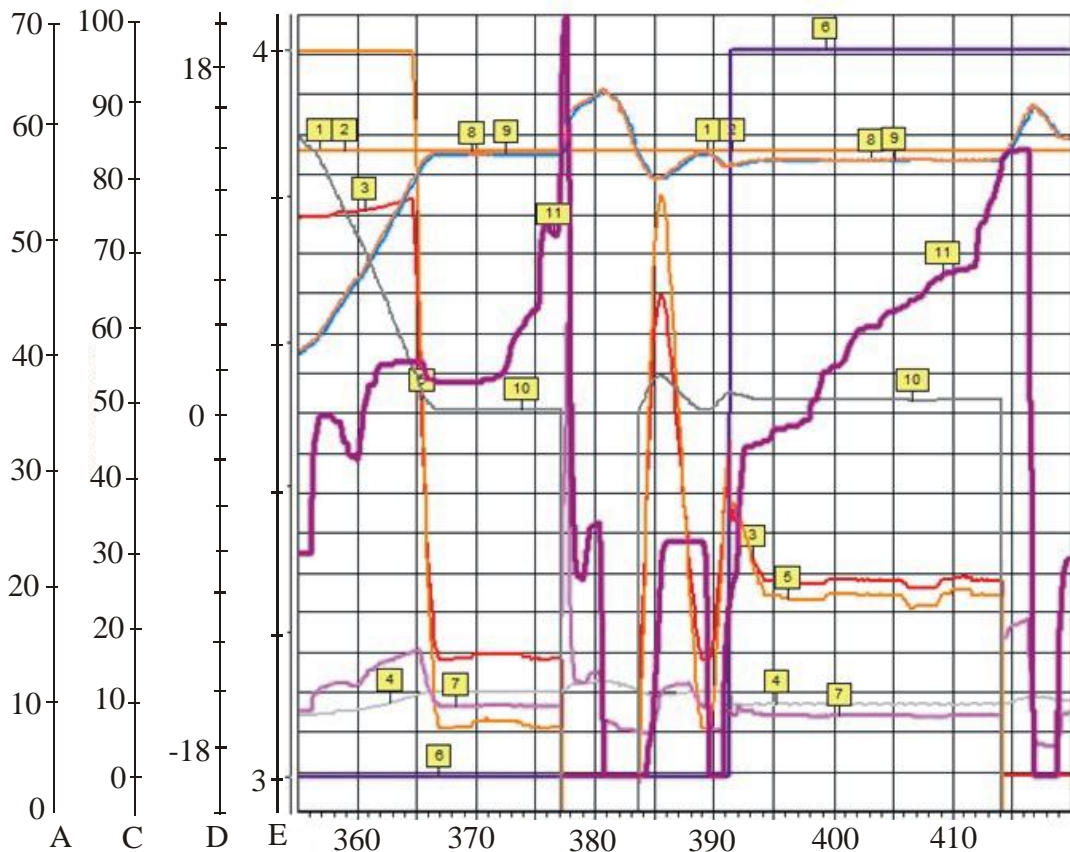


Рисунок 4.12 – Регулирование в режиме ограничения скорости в функции времени

Таким образом, реализация алгоритма переключения позволяет исключить ложные деактивации функции и дает возможность правильно определить номер передачи при движении на подъем или на спуск.

Переключение передачи и поведение дроссельной заслонки в режиме поддержания скорости представлено на рисунке 4.13.

Компонент расчета длительности отклонения от заданной скорости.

Компонент необходим для безопасного регулирования скорости транспортного средства. Предполагается что при крутом подъеме, когда функция не способна поддерживать заданную скорость, или, наоборот, при быстром спуске, необходимо передать управление дросселем водителю и при этом произвести деактивацию компонента.

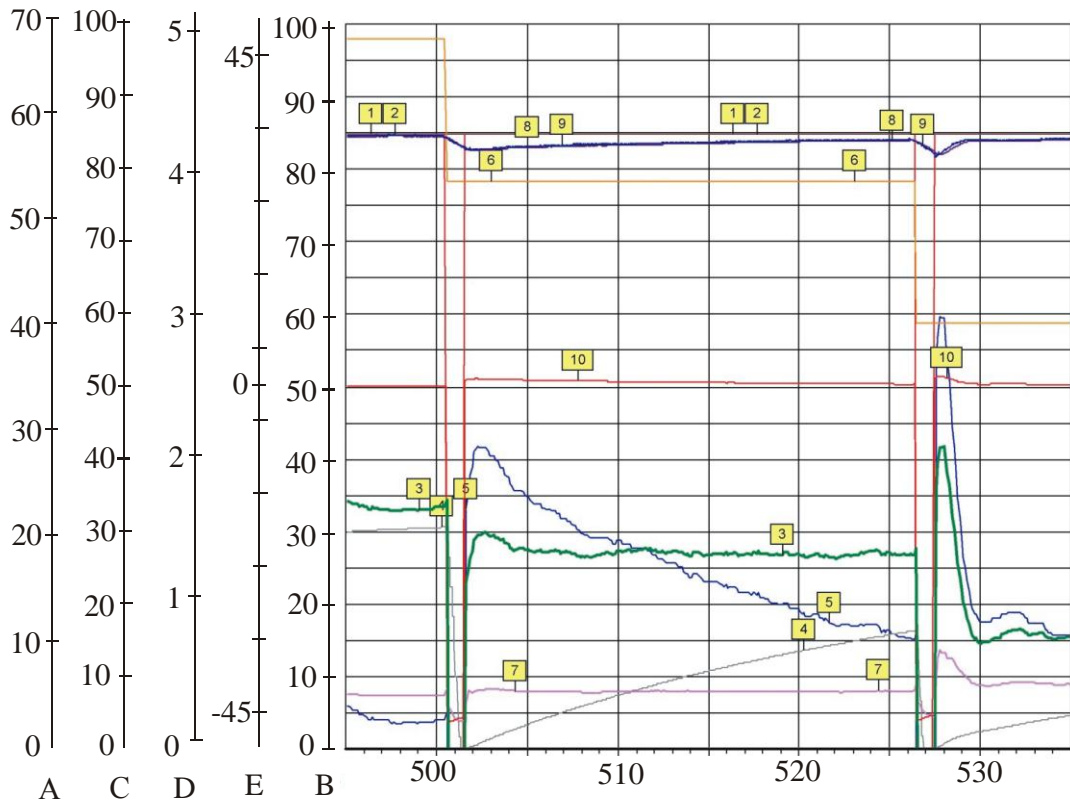


Рисунок 4.13 – Процесс регулирования скорости в функции времени в режиме переключения передач КПП

Вторым назначением функции является помощь водителю в достижении заданной скорости движения в зависимости от длительности отклонения от уставки. Предполагается что при большом отклонении от уставки недопустимо резкое увеличение скорости, а необходимо постепенно возвращаться к заданной скорости путем плавного приоткрытия дросселя на необходимую величину и в последующем возвращать его в оптимальное положение для дальнейшего поддержания заданной скорости.

Третье назначение это функция безопасности. Если ускорение или замедление с отклонением от уставки по длительности превышает заданную константу,

тогда производится деактивация функции поддержания или ограничения скорости.

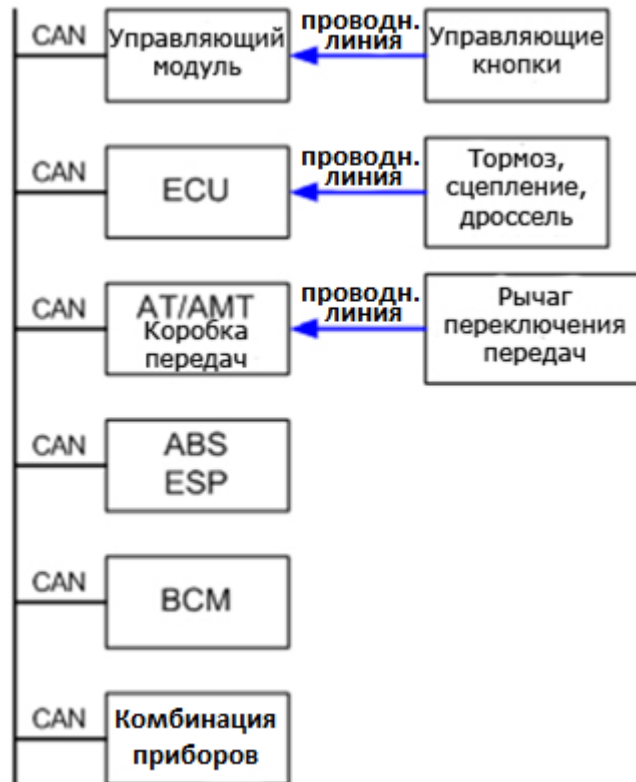
Ограничение и деактивация процесса регулирования. Ограничение и деактивация процесса регулирования скорости необходимы при условиях, когда процесс работает в недопустимых режимах. При этом необходимо обеспечить его немедленную деактивацию. Различают два типа компонентов деактивации и ограничений: ограничение процесса поддержания скорости; отключение компонента ограничителя скорости.

Разработанные модели представляют собой универсальный комплекс позволяющий разрабатывать компоненты других электронных систем автомобиля: системы автоматической парковки и адаптивной системы поддержания скоростного режима.

4.3 Реализация электронной системы регулирования скорости движения АКЭУ в режимах поддержания и ограничения скорости

Система регулирования скоростью движения охватывает электронные модули управления автомобилем (рисунок 4.14). Информационный обмен между модулями (рисунок 4.14) осуществляется по шине CAN 500 kbod/s. В настоящее время, среди наиболее перспективных принципов организации архитектуры обмена информацией между модулями выделяется так называемый кольцевой принцип, который использует контроллер управления системой (GATEWAY) представляющий собой отдельный модуль управления. Достоинством кольцевой организации обмена данными является то, что в случае обрыва в шине передача данных осуществляется по оставшейся связи. Особенности такой архитектуры шины является и то, что в случае, когда все модули не активны, их инициализация может быть выполнена отправкой сообщения из любого модуля системы. При этом важным фактором является то, что каждый контроллер, который подключен к шине, должен быть активирован и быть готовым к приему и отправке информа-

ции не позднее чем через 100 миллисекунд с момента появления сигнала активации на шине [165].



Control module – управляющий модуль; ECU – контроллер системы управления ДВС; АТ/АМТ Gearbox – автоматическая / роботизированная коробка переключения передач (КПП); ABS, ESP – антиблокировочная система, электронная система стабилизации траектории движения; BCM – центральный блок кузовной электроники; Combi instrument – комбинация приборов; Control buttons – кнопки управления; Brake, Clutch, Throttle – тормоз, сцепление, дроссельная заслонка; проводная связь; CAN – линия информационной связи

Рисунок 4.14 – Модули системы регулирования скорости движения легкового автомобиля

Физический уровень сигналов передаваемых по шине CAN описывается рисунком 4.15. Скорость шины 500 kbod/s, погрешность +/- 0,1%, допуск на искажение длительности импульса +/- 0,1%. Активной считают область импульса в промежутке от 65 до 85% его длительности. Для обеспечения корректного функционирования всех модулей, процент загрузки шины CAN не должен превышать 50%. Для проверки соответствия данного требования широко используют прибор CANalyser фирмы Vector. Данное устройство позволяет читать сообщения и имитировать их с заданными параметрами, производить анализ загрузки шины.

Шина CAN должна обладать стабильностью во всем температурном диапазоне эксплуатации автомобиля на протяжении 10 лет. Такие же требования предъявляются к компонентам шины. Рекомендуется соблюдение требований стандарта ISO 11898 [166].

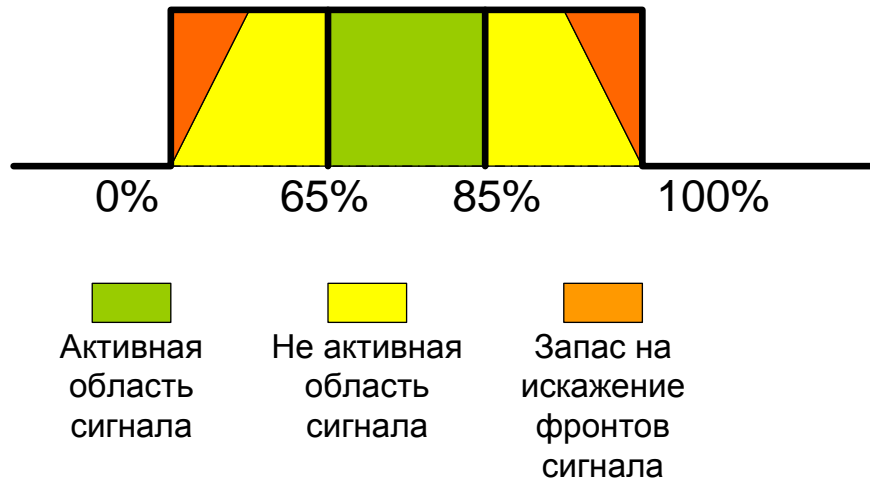


Рисунок 4.15 – Физический уровень сигнала шины CAN

Работа программно-аппаратного комплекса системы регулирования. После подачи первичного импульса напряжения (KL15) каждый модуль должен активироваться не позднее чем в течение 100 мс и быть готовым к приему и передаче сообщений. Первое сообщение должно уйти от каждого контроллера и быть принято остальными модулями не позднее 100 мс, с момента первичного сигнала (KL15).

Модуль управления (Control module) соединен с управляющими кнопками посредством проводного соединения. Он может быть выполнен с использованием канала АЦП микроконтроллера или специализированных микросхем: демультиплексоров, с интерфейсными шинами 1-wire. Данный способ используется для сокращения числа проводов между модулем управления, джойстиком, и кнопками. Предпочтение отдается АЦП как наиболее дешевому способу для декодирования состояний нажатия кнопок. Кроме того, данный способ позволяет осуществлять диагностику обрыва линии связи кнопок и управляющего модуля. При этом модуль управления осуществляет диагностику проводного соединения клавиш, вы-

полняет антидребезговые функции, а лишь потом определяет наличие нажатия клавиши и вычисляет длительность информационных сигналов [165].

Информационные потоки, характеризующие работу тормозной системы и отражающие физическое положение дроссельной заслонки попадают в контроллер управления ДВС (ECU). При нажатии на педаль тормоза происходит срабатывание первой контактной пары выключателя педали тормоза, после чего происходит срабатывание второй контактной пары. Первая контактная пара отвечает за работу стоп сигнала (BLS), а вторая – за тестирование сигнала нажатия педали тормоза (BTS). Период времени между срабатыванием первой и второй контактной пары не превышает установленное значение 100 мс. При этом конструкция выключателя организована так, что в ней отсутствует дребезг контактов при нажатии на педаль. В случае отсутствия сигнала BTS в заданный интервал времени или появления его первым при нажатии на педаль тормоза, должна включаться система диагностики, которая для безопасности эксплуатации автомобиля может обеспечить отключение функции регулирования скорости.

Идентификация сигнала нажатия на педаль сцепления может быть реализована как программно, так и аппаратно [151]. Программный метод позволяет распознать нажатие педали по изменению числа оборотов двигателя (которые определяются с помощью датчика положения коленчатого вала) по отношению к скорости автомобиля. В настоящее время для реализации данной функции, наиболее широкое применение нашли бесконтактные датчики педали сцепления и педали тормоза, основанные на эффекте Холла. Такие датчики позволяют с высокой точностью и быстродействием оповестить контроллеры о факте нажатия на ту или иную педаль и не прихотливы к внешним условиям эксплуатации и обладают повышенным сроком службы.

Дроссельная заслонка, подключенная к контроллеру управления двигателем, выполняет основную функцию регулирования скорости. В дроссельной заслонке имеется два датчика, представляющие собой потенциометры, которые позволяют контролировать величину открытия дроссельного патрубка. При обнаружении неисправности потенциометров, система диагностики производит деакти-

вацию функции управления скорости. При этом дроссельная заслонка приобретает приоткрытое «парковочное» положение. В таком положении двигатель способен работать на холостом ходу и имеется возможность осуществлять дальнейшее движение.

В зависимости от типа трансмиссии установленной на АКЭУ система переключения передач КПП управляется либо механически, либо с помощью электропривода. К системе регулирования скоростного режима можно адаптировать три типа КПП: механическую (МКПП); автоматическую (АКПП); роботизированную (РКПП).

Реализация различных типов КПП в составе АТС определяет особенности поведения системы регулирования скорости движения. В случае механической КПП, при переключении передач наблюдается некоторое запаздывание сцепления нажимного и выжимного дисков, что создает сложности при определении текущей передачи, вплоть до момента полного сцепления. Самым простым способом решения этой проблемы является использование счетчика с калибровочной константой, в котором задается длительность отпускания педали сцепления (срабатывание контактных групп выключателя). После этого определение передачи считается корректным. По скорости изменения соотношения числа оборотов и скорости движения можно спрогнозировать номер передачи, который будет определен через определенный промежуток времени.

Главной особенностью автоматических и роботизированных типов трансмиссии является то, что переключение передач осуществляется посредством электроприводов. При этом важно обеспечить правильную логику обмена сообщениями по шине CAN между коробкой передач (АТ/АМТ Gearbox) и контроллером управления двигателем (ECU). Любые ошибки могут привести к критическим последствиям. Например, включение пониженной передачи на высокой скорости [161, 166].

Основным компонентом системы регулирования скорости движения АКЭУ (рисунок 4.14) конечно является контроллер управления ДВС. Именно он принимает решения связанные с активацией или деактивацией и запретом функции ре-

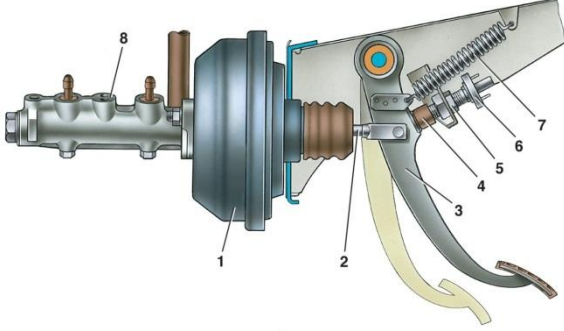





гулирования скорости. Центральный блок кузовной электроники (BCM) берет на себя функции связанные с безопасностью и диагностикой системы.

Компонентную область системы регулирования скоростного режима [151] составляют исполнительные элементы и органы управления представленные в таблице 4.1.

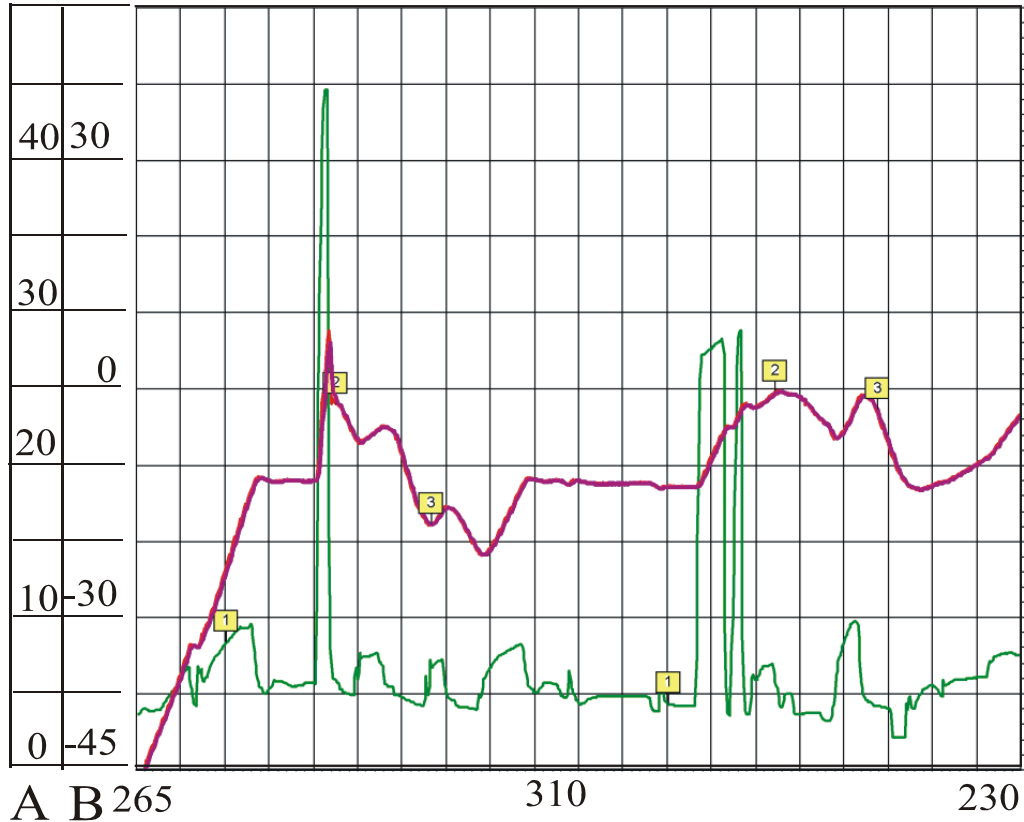
Для высокого уровня качества функционирования системы регулирования скорости движения, необходимо обеспечить: заданный физический уровень шины (форма сигнала, уровень напряжение, смещение и искажение); соответствующий программный уровень. Контроллеры, подключенные к шине должны выполнять отправку и прием обозначенных информационных потоков. При этом некоторые из них должны отправляться или приниматься в заданном цикле, а другие по событию.

Проверка и адаптация системы регулирования скоростного режима. Первоначально проверяется работа всепропускающего фильтра. Данная функция является основой работы системы регулировки скорости, поэтому от качества ее работы зависит плавность регулировки. Функция фильтра программируется в контроллер управления ДВС вместе с основным программным обеспечением. На АКЭУ устанавливается регистрирующее устройство, позволяющее проводить записи параметров в режиме реального времени. При проведении тестового заезда, регистрируются входные и выходные параметры фильтра. При этом производится корректировка коэффициентов фильтрации и определяется желаемый временные характеристики работы. Процесс проверки всепропускающего фильтра представлен на рисунке 4.16.

Таблица 4.1 – Основные компоненты системы регулирования скорости движения легкового АКЭУ

<p>1 Педаль (выключатель) тормоза</p> 	<p>2 Педаль (выключатель) сцепления</p> 
<p>3 Педаль акселератора (потенциометр)</p> 	<p>4 Рычаг (выключатель) стояночного тормоза</p> 
<p>5 Дроссельная заслонка (привод и потенциометр)</p> 	<p>6 Рычаг переключения передач</p> 

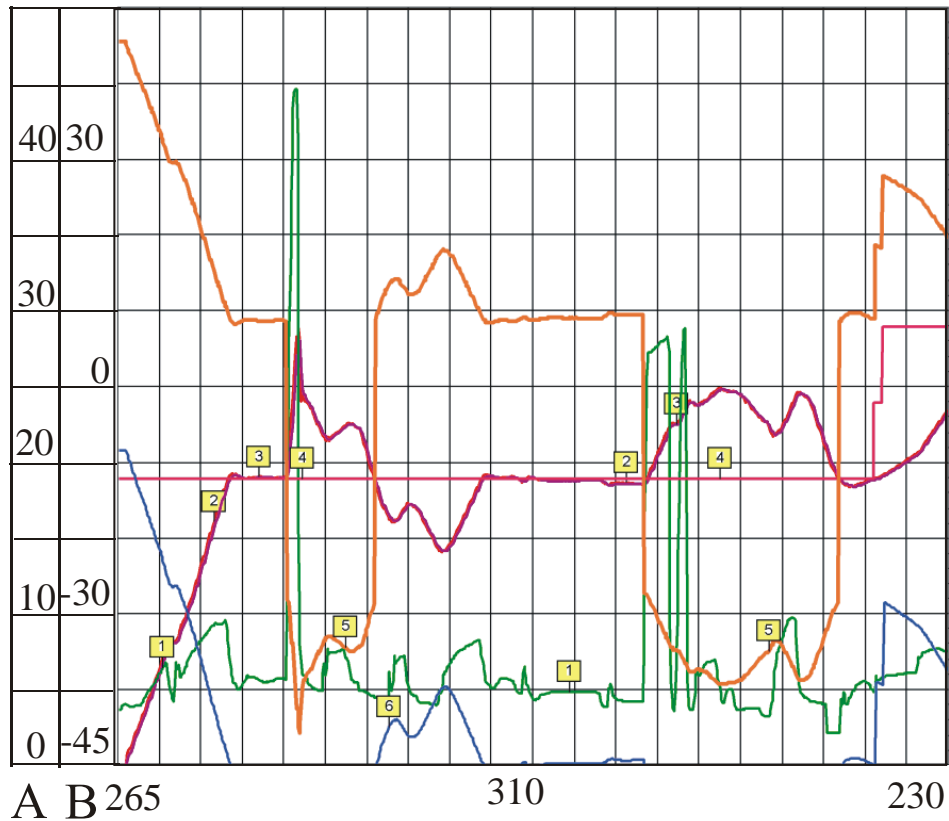
Определение рассогласования заданной скорости. Для того чтобы осуществлять регулирование скорости определяют величину отклонения (рассогласования) заданной скорости от фактической. Данный механизм позволяет определить существенность отклонение заданной в системе скорости от фактической. Соответствующая диаграмма оценки рассогласования скорости представлена на рисунке 4.17.



1 – положение дроссельной заслонки (%), 2 – скорость автомобиля км/ч;
3 – фильтрованная скорость (км/ч)

Рисунок 4.16 – Диаграммы проверки работы всепропускающего фильтра в функции времени (с.)

Отладка функций пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора. Для соответствующей отладки работы ПИ регулятора реализуются алгоритмы работы системы при движении АКЭУ по ровной дороге. Предварительно заполняются калибровочные таблицы для ПИ регулятора. После этого обеспечивают процесс инициализации табличного коэффициента для интегральной части регулятора в соответствие с текущим положением дроссельной заслонки.



1 – положение дроссельной заслонки (%); 2 – скорость автомобиля (км/ч);
 3 – фильтрованное значение скорости (км/ч); 4 – уставка скорости для режима ограничения (км/ч); 5 – дифференциальная скорость (величина рассогласования, км/ч); 6 – скорректированное значение рассогласования скорости (км/ч)
 Рисунок 4.17 – Диаграмма, оценки рассогласования скорости, в функции времени

Таким образом, показана система регулирования скоростного движения АКЭУ с реализацией функции централизации управления, в рамках единого комплекса, что обеспечивает более эффективную работу всех электронных модулей АТС за счет разделения информационных потоков по уровню приоритета.

4.4 Моделирование и реализация системы изменения фаз газораспределения (VVT) автомобилей с КЭУ.

При разработке и моделировании алгоритма системы управления двигателя с VVT разработчики сталкиваются с проблемой синхронизации зубчатого диска коленчатого вала и распределительного вала, а также определения текущего положения распределительного вала, которое является основным входным параметром.

ром для алгоритма управления двигателя с изменяемыми фазами. Именно этот параметр используется для расчета уставки положения распредвала и в алгоритме ПИД регулирования.

Для решения этой задачи применяются программно-аппаратные алгоритмы синхронизации коленчатого вала и распредвала. Данные алгоритмы используют входные сигналы от датчика положения коленчатого вала (ДПКВ) для определения текущего положения поршней в цилиндрах, расчета искры зажигания и момента подачи топлива. По сигналу с датчика фазы (ДФ) определяется текущее положение распредвала и номер такта двигателя для быстрой синхронизации [165, 166].

Общие принципы синхронизации по сигналу с датчика положения коленчатого вала (рисунок 4.18). Для обеспечения базовой синхронизации по коленчатому валу используется группа таймеров из модуля таймеров общего назначения GPT (General Purpose Timers) и подключенный к ним регистр захвата/перезагрузки CAPREL. Таймер T1 предназначен для отсчета периода следования зубьев, а T2 предназначен для генерации виртуальных дискретных зубьев, разбивающих период следования зубьев $T_{зуб}$ на 8 или 16 дискретных зубьев длительность чередования которых $T_{дискр.зуб}$. Разбитие на дискретные зубья требуется для обеспечения большей точности синхронизации впрыска и времени накопления искры зажигания.

Таймер T1 инициализируется сразу после инициализации контроллера и инкрементируется на каждом такте с частотой, определяемой делителем системной частоты для таймера T1. Таймер настроен на прерывание по переднему фронту от зуба коленчатого вала и имеет высокий приоритет. При прерывании от каждого зуба вызывается функция, синхронизации по коленчатому валу в которой определяются и рассчитываются дополнительные параметры, требуемые для синхронизации.

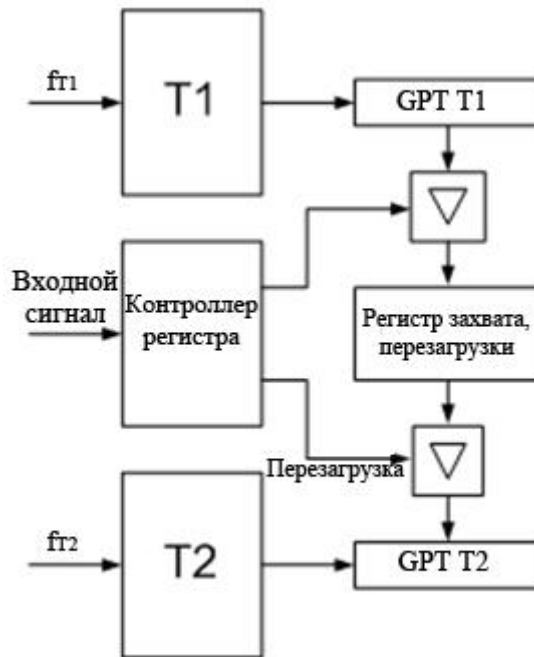


Рисунок 4.18 – Структура модуля синхронизации по сигналу с датчика положения коленчатого вала

Таймер T2 инициализируется одновременно с запуском таймера T1. После получения значения CAPREL он заполняет свой счетный регистр и декрементируется на каждом такте с частотой определяемой предделителем системной частоты для таймера в 8 или 16 раз большей чем частота тактирования таймера T1. После каждого обнуления он вновь заполняется текущим значением регистра CAPREL.

Величина CAPREL показывает длительность периода чередования дискретных зубьев $T_{зуб}$. После прихода каждого нового зуба CAPREL обновляется новым значением, до которого успел досчитать таймер T1, а тот в свою очередь сбрасывается. Таким образом, это позволяет разбивать период следования зубьев коленчатого вала на интервалы времени, соответствующие длительности следования дискретных зубьев одинаковой величины. Значение CAPREL привязано к таймеру T1, а значит защелкнутое значение будет соответствовать периоду следования зубьев и вычисляться по формуле

$$T_{зуб} = CAPREL \cdot (1/f_{T1}) \quad (4.8)$$

Например: 1-й вариант конфигурации: при частоте $T1=625000\text{Гц}$ и частоте оборотов коленчатого вала 600 мин^{-1} , $\text{CAPREL}=1091$: $T_{\text{зуб}} = 1091 \cdot (1/625000) = 0,0017456\text{ с}$. 2-й вариант конфигурации: при частоте $T1=1250000\text{Гц}$ и частоте оборотов коленчатого вала 600 мин^{-1} , $\text{CAPREL}=2182$: $T_{\text{зуб}} = 2182 \cdot (1/1250000) = 0,0017456\text{ с}$.

В момент прихода двух пропущенных зубьев, величина CAPREL отличается от нормального значения периода следования зубьев, поэтому для обновления таймера T2 используется предыдущее значение CAPREL. После того, как будет пройден первый зуб и пройдет его подтверждение путем определения второго зуба, величина счетчика дискретных зубьев сбрасывается после каждого второго оборота коленчатого вала или после одного полного оборота распредвала. Таким образом количество виртуальных дискретных зубьев соответствует величине 960 или 1920 (что определяется настройкой предделителя таймера T2).

По количеству пройденных дискретных зубьев определяется угол поворота коленчатого вала (ПКВ) в градусах поворота коленчатого вала. Отличие заключается в количестве дискретных зубьев приведенных к величине угла поворота коленчатого вала. Количественная ошибка дискретных зубьев зависит от частоты оборотов и корректируется после каждого следующего реального зуба, если число зубьев отличается от теоретического значения. Пример реализации представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Пример реализации алгоритма синхронизации по сигналу с датчика положения коленчатого вала

Наименование параметра	1-й вариант конфигурации	2-й вариант конфигурации
$N_{\text{дискр.зуб}}$	284	142
$\alpha_{\text{дискр.зуба}}, \text{°ПКВ}$	0,375	0,75
$\alpha_{\text{п.к.в.}}, \text{°ПКВ}$	106,5	106,5

При производстве ДВС распредвал и коленчатый вал устанавливаются по отношению друг к другу таким образом, чтобы два пропущенных зуба всегда соответствовали либо активному, либо нулевому уровню сигнала с датчика фаз при

любом взаимном положении распредвала в момент фазирования и в парковочной позиции фазера. Таким образом, начальный номер такта определяется по сигналу с датчика фаз [166].

В современных конструкциях ДВС распределительных валов может быть несколько, а система отсчета должна быть одна, относительно которой уже определяется отклонение положение распредвала от условного нулевого положения.

Длительность следования зубьев коленчатого вала $T_{\text{зуба}} = CAPREL$ определяется в прерывании по сигналу с ДПКВ. Время следования виртуальных зубьев $T_{\text{дискр.зуба}} = \frac{CAPREL}{n}$, где $n=8$, определяется настройкой предделителя $\alpha_{\text{зуба}} = 6$ град. Период следования одного зуба коленчатого вала $\alpha_{\text{дискр.зуба}} = 0.75$ град.

В основу системы синхронизации заложена работа таймера GPT (рисунок 4.18), который позволяет, прежде всего, произвести синхронизацию по зубчатому колесу коленчатого вала. В модуле GPT имеется, как правило, два таймера. Первый таймер считает в сторону увеличения с заданной частотой $f=f_{T1}$. Вторым таймером T2 настроен на частоту в восемь раз больше, чем таймер T1. Назначение второго таймера это получение дополнительных дискретных зубьев, которые служат опорными точками при вычислении времени накопления искры зажигания и для определения времени открытия топливных форсунок [165].

Первоначальное состояние таймера T1 нулевое. Таймер инициализируется после подачи питания на контроллер при включенной клемме 15 при и пуске стартера. После этого при появлении сигнала на датчике положения коленчатого вала, соответствующего первому распознанному зубу, таймер сбрасывается в 0 и начинает расчет сигналов. В момент сброса таймера, происходит копирование счетного регистра в регистр захвата и перезагрузки CAPREL (Capture reload register). После заполнения регистра CAPREL стартует таймер T2, который считает в 8 или 16 раз быстрее (в зависимости от типа зубчатого колеса) и работает в сторону декрементации. По каждому достижению нуля счетного регистра этого таймера срабатывает прерывание, показывающее на то, что пройден виртуальный дискретный зуб. Дискретные зубья необходимы для более точной синхронизации

и расчета момента накопления искры зажигания и подачи топлива через форсунку. Виртуальные дискретные зубья соответствуют некоторой величине градусов поворота коленчатого вала. К примеру, если зубчатое колесо поворота коленчатого вала имеет 58 зубьев плюс два отсутствующих, то каждому реальному зубу будет соответствовать 8 или 16 виртуальных дискретных зуба, которые с большей точностью позволяют определить положение коленчатого вала. Необходимо помнить, что при изменении частоты вращения в сторону увеличения или уменьшения при прохождении каждого реального зуба должно быть 8 или 16 виртуальных дискретных зубьев. Если этого не произошло, тогда требуется скорректировать величину виртуальных дискретных зубьев по приходу прерывания от следующего зуба для обеспечения отсутствия ошибки в работе системы.

Синхронизация коленчатого вала и распредвала выполняется после того, как реализована синхронизация по коленчатому валу. Синхронизация распредвала с коленчатым валом выполняется по задним фронтам зубчатого колеса распределительного вала. Для того чтобы вычислить текущее положение коленчатого вала требуется определение нескольких параметров: номер зуба коленчатого вала, после которого произошло программно-аппаратное прерывание от распредвала, значение регистра таймера в момент прерывания от распределительного вала, номер такта, накопленное значение виртуальных дискретных зубьев [166].

До начала синхронизации по распределительному валу считывается активный уровень сигнала с датчика фаз. Он может быть как положительный, так и нулевой. Это позволяет определить порядковый номер такта после прохождения репера (двух отсутствующих зубьев). Это необходимо также для реализации алгоритма и инициализации счетчика фронтов от распредвала и определения начального номера такта ДВС. В прерывании от распределительного вала производится пересчет параметров из процессорного времени в условные физические единицы (рисунок 4.19).

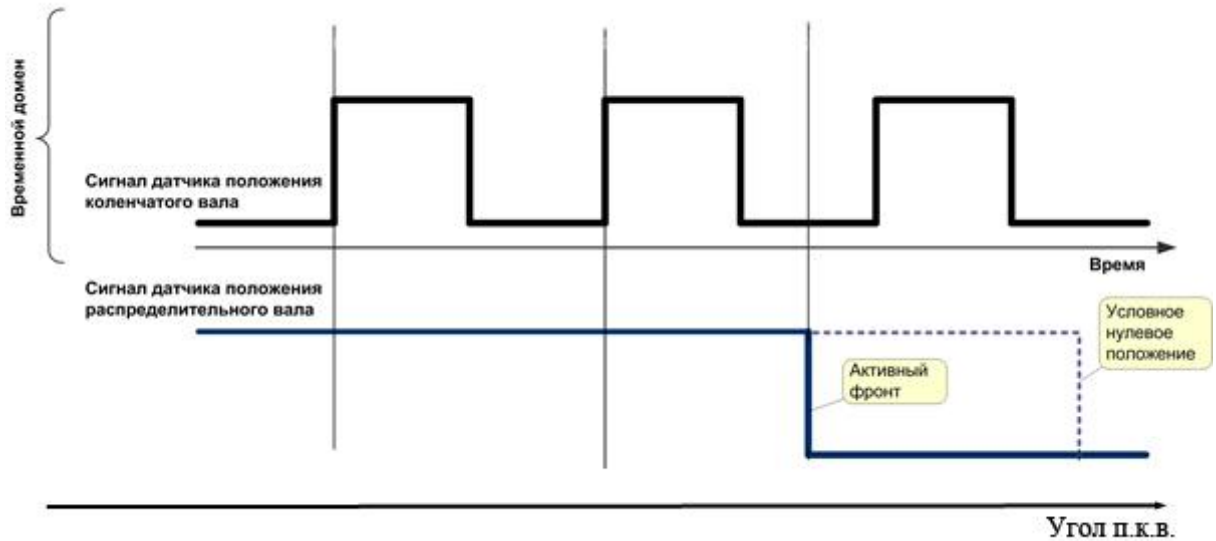


Рисунок 4.19 – Диаграмма синхронизации коленчатого и распределительного вала ДВС автомобиля с КЭУ

4.5 Моделирование и реализация электронной системы управления «Старт – Стоп» АКЭУ.

Система «Старт-Стоп» предназначена для снижения вредного техногенного воздействия на окружающую среду автомобиля путем оптимизации работы ДВС, при этом достигаются эффекты: снижение расхода топлива; снижения вредных выбросов в атмосферу (рисунок 4.20). Процессы улучшения связаны со снижением времени работы двигателя в режиме холостого хода, а также частичной рекуперации энергии при движении накатом или при торможении [165, 166]. Дополнительно система позволяет оптимизировать энергобаланс АКЭУ и увеличить ресурс систем электропитания и пуска АТС, не зависимо от индивидуального характера вождения и условий его эксплуатации.

Система «Старт – Стоп» позволяет выполнять быстрые и эффективные пуски, в результате которых снижается объем вредных выбросов и уменьшается время работы электростартера, производится подача топливовоздушной смеси с оптимальным соотношением и производится корректный расчет искры зажигания.

«Старт – Стоп» работает под управлением электронной системы управления ДВС (ЭСУД). Контроллер ЭСУД выполняет функцию диагностики датчиков

системы «Старт – Стоп», а индикация отказов в системе реализована через комбинацию приборов. Контроллер регистрирует коды неисправностей и передает их по запросу диагностического оборудования.

Стандартная стратегия управления	стратегия управления „Stop-in-Gear“
Сокращение выбросов CO ₂ по сравнению с серийным уровнем*	Сокращение выбросов CO ₂ по сравнению с серийным уровнем*
- 3,7%	Vab = 0 км/ч - 4,8% при Vab = 10 км/ч дополнительные ~0,6 %

Рисунок 4.20 – Оценка параметров снижения уровня вредных выбросов при внедрении системы управления «Старт – Стоп»

Логическая структура, а также модель системы представлена на рисунках 4.21, 4.22.

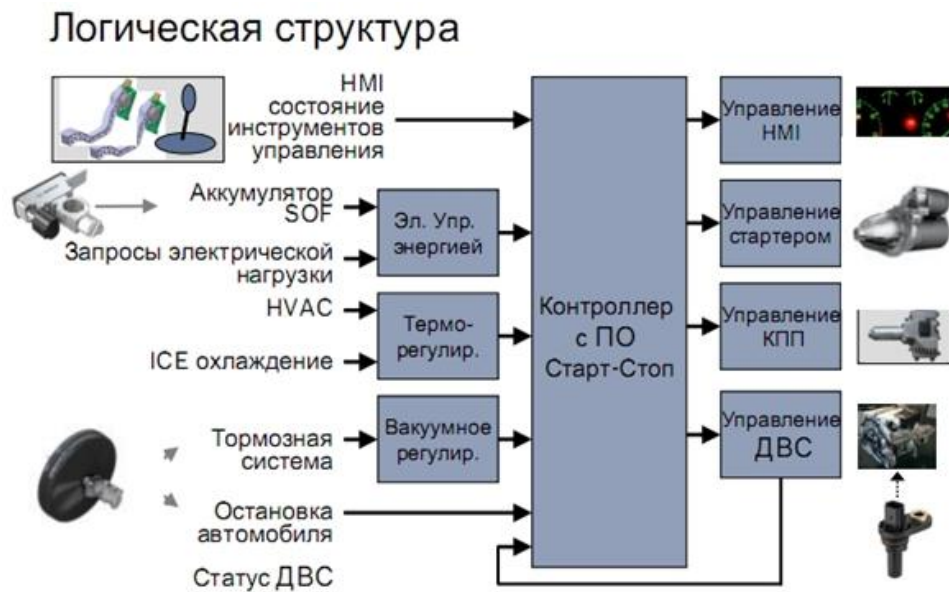


Рисунок 4.21 – Логическая структура электронной системы управления «Старт – Стоп»

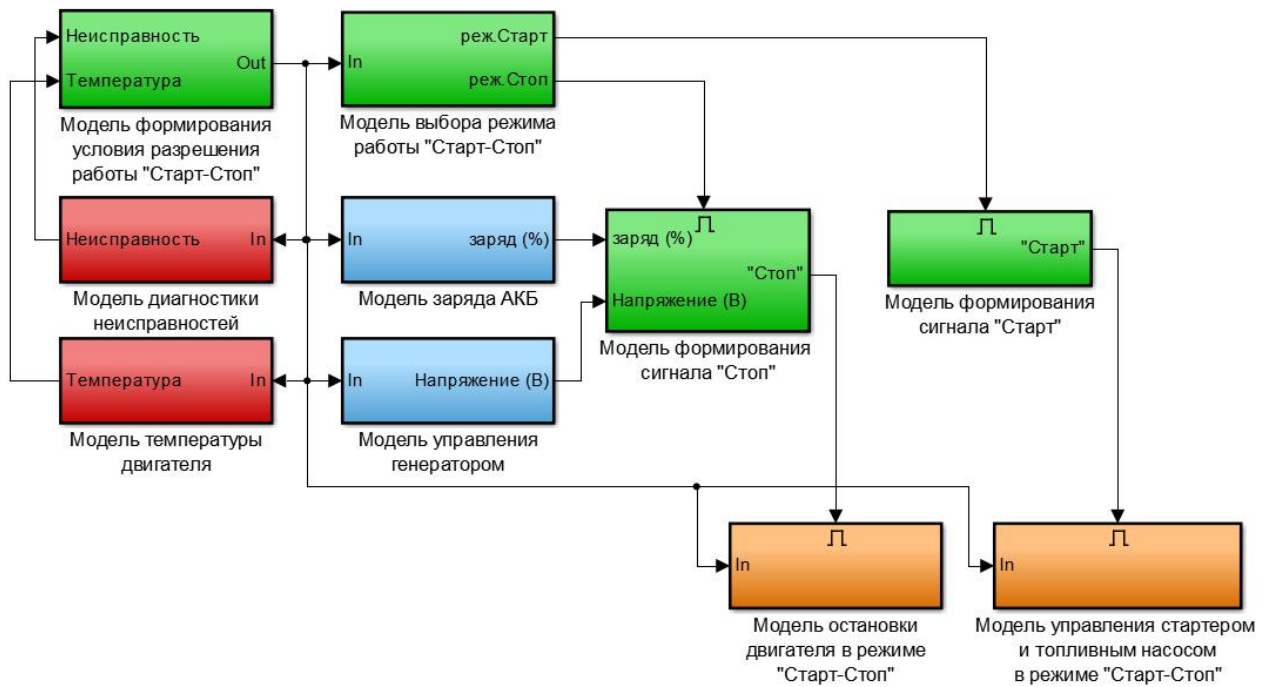


Рисунок 4.22 – Структура модели электронной системы управления «Старт-Стоп»

В аппаратный состав системы, в качестве элементов исполнительного звена входят: датчик нейтрального положения рычага переключения передач; датчик педали сцепления; вакуумный насос тормозной системы; датчик угла поворота рулевого колеса; выключатель (кнопка включения) системы с индикатором состояния; ремень безопасности водителя; выключатель закрытой двери; датчики температуры; выключатель капота; аккумуляторная батарея; интеллектуальная генераторная установка; регулятор напряжения; интеллектуальный датчик положения коленчатого вала на эффекте Холла; регулятор напряжения.

Для управления системой «Старт – Стоп» в программном обеспечении ЭСУД должны быть предусмотрены 4 основных модуля:

- 1 модуль формирования сигнала для активизации процесса остановки двигателя;
- 2 модуль формирования сигнала «Старт» предназначенного для активизации процесса разрешения пуска двигателя;
- 3 модуль контроля заряда батареи;
- 4 модуль управления генераторной установкой.

При реализации электронной системы управления «Старт – Стоп» несколько меняется качественный состав основных компонентов системы электрооборудования: требуется установка электростартера с повышенным ресурсом (рисунок 4.23); в систему интегрируется генераторная установка с элементами интеллектуального управления (рисунок 4.24); вместо обычного электронного датчика положения коленчатого вала (ДПКВ), устанавливается интеллектуальный аналог (рисунок 4.25); внедряется электронный датчик аккумуляторной батареи (рисунок 4.26); устанавливается дополнительный стабилизатор напряжения DC/DC (рисунок 4.27); кроме того, в систему устанавливается ряд дополнительных компонентов (рисунок 4.28).

Стартер с повышенным ресурсом

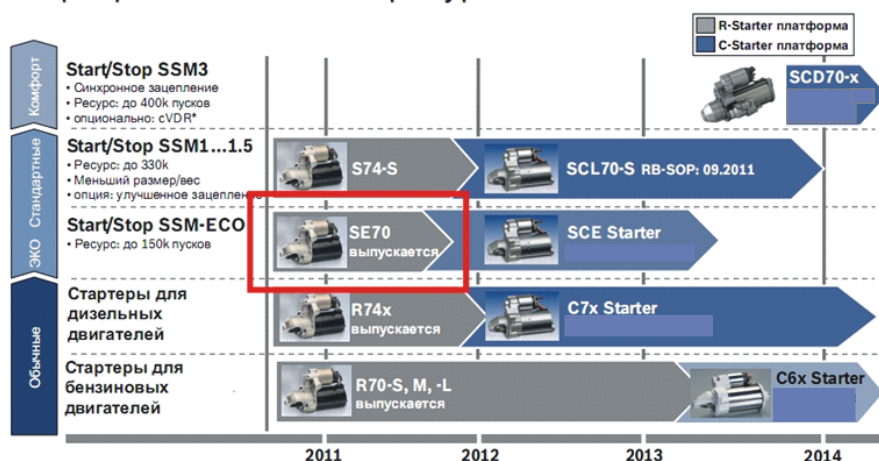


Рисунок 4.23 – Совершенствование конструкции электростартера в развитии системы «Старт – Стоп»

Высокоэффективный генератор на базе В3-110 с регулятором LIN


Изделия до 125А							Компактные для легковых пассажирских автомобилей
Тип	В 1-70	В 3-70	В 3-90	В 3(Е)-110	В 3Р-115	В 5-125	
Мощность @ 1.800 об/мин [А]*	37	40	50	55	60	65	 Повсеместное производство на развивающихся рынках, в ЕС и СА
Мощность @ 6.000 об/мин[А]*	70	70	90	110	115	125	
КПД. VDA [%]	54	62	62	63 (66)	62	66	
Макс. окр. температура. [°C]	95 (105)	95 (105)	95 (105)	95 (105)	95 (105)	95 (105)	
Инерция [кгсм²]	16,5	22	22	22	22	25	
Вес со шкивом [кг]	4,2	4,7	4,8	4,9	5,0	5,5	
Внешний диаметр [мм]	125	136	136	136	136	140	
Длина без шкива [мм]	117,5	117,5	117,5	117,5	117,5	120,5	
Магнитный шум [дБА]	< 74	< 74	< 74	< 74	< 74	< 74	
Аэродинамический шум [дБА]	< 94	< 94	< 94	< 94	< 94	< 94	

Рисунок 4.24 – Улучшение параметров генераторной установки в развитии системы «Старт – Стоп»

Интеллектуальный ДПКВ



Особенности

- Определение направления вращения
- Работа на принципе Холла
- Для многополюсных и стальных задающих дисков
- Широкий температурный диапазон работы
- Высокая точность
- Широкий диапазон скорости 0 ... 10000 rpm
- Индивидуальная конструкция для клиента

Преимущества

- Надежная конструкция
- Высокая точность
- Широкий диапазон зазора с диском
- Малый размер
- Хорошие показатели ЭМС
- Питание 5V или 12V
- Низкий уровень выбросов, расход топлива
- Возможность использования в гибридных и автомобилях с системой Старт-Стоп

Рисунок 4.25 – Интеллектуальный датчик положения коленчатого вала в системе «Старт – Стоп»

Электронный датчик аккумуляторной батареи

Особенности

- Установка в минусовую нишу всех стандартных АКБ
- Подходит для установки в подкапотном пространстве (до 105°C)
- Очень высокая точность измерений и интегрированный алгоритм определения состояния батареи
 - Ток 10 mA ... 1300A +/- 1%
 - Напряжения 6V ... 18V +/- 0,25%
 - Температура -40 °C ... 80°C +/- 4K
- Интерфейс LIN 2.1
- Штекер 2-pin AMP

Преимущества для клиента

- Пригоден для функций Старт-Стоп, рекуперации и энергоменеджмента
- Надежное электропитание потребителей в автомобиле
- Диагностика АКБ во время производства, транспортировки и в эксплуатации

Installation location

Power supply

Communication via LIN interface to the engine control unit

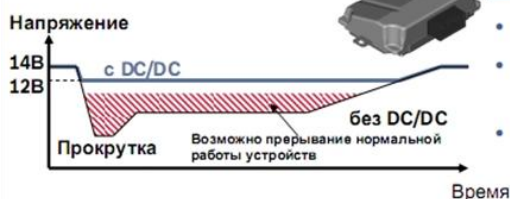
Model: ECU 4.0, Motorsteuerung, Motor ECU 4.0, Body computer

Рисунок 4.26 – Реализация электронного датчика АКБ в системе «Старт – Стоп»

Стабилизатор напряжения DC/DC

Функция

- Стабилизация уровня напряжения для участка электрической цепи во время запуска двигателя
- Подключенные устройства работают без перебоев (прерывание радио или сброс установок навигационной системы)



Основные технические данные

- Модульная концепция с мультифазовым конвертером
- Мощность: 200W или 400W
- Выходное / Входное напряжение: 12V / >= 7V (в режиме конверсии)

Интеграция в автомобиль

- Независимый ЭБУ
- Дополнение к существующей электрической архитектуре
- Монтаж в автомобиле с помощью болтов или установкой в нишу

Рисунок 4.27 – Установка дополнительного стабилизатора напряжения DC/DC в системе «Старт – Стоп»

Дополнительные компоненты системы Старт-Стоп

- Дополнительный датчик положения педали сцепления в следующей комбинации: 1 потенциометр + 1 переключатель или 2 переключателя (10% и 90%)
- Индикатор состояния системы Старт-Стоп: отдельный LED или информирование водителя через панель приборов, передавая информацию по шине CAN
- Кнопка принудительного отключения системы Старт-Стоп

Рисунок 4.28 – Дополнительные компоненты системы «Старт – Стоп»

Система «Старт – Стоп» оказывает определенное влияние на ЭСУД автомобиля (рисунок 4.29).



Рисунок 4.29 – Функции системы «Старт – Стоп» влияющие на работу ЭСУД

Формирование сигнала разрешения остановки двигателя. Данный модуль инициализирует остановку двигателя. При появлении признака разрешения остановки двигателя производится запрет топливоподачи, подачи искры зажигания,

что приводит к остановке двигателя. Функции топливоподачи и расчета искры зажигания выполняются отдельно, поэтому для модуля остановки достаточно только сгенерировать запрет на прерывание. Разрешение остановки двигателя реализуется при комплексном выполнении условий: педаль сцепления не нажата; температура хладагента выше указанного порога, при котором разрешена остановка; функция включена и активна; обнаружено состояние простоя, при котором скорость автомобиля меньше чем калибровочное значение в заданном интервале времени; величина уставки оборотов холостого хода меньше величины оборотов двигателя; выполняется условие простоя двигателя; уровень заряда аккумулятора больше установленного порога уровня заряда; «задняя» передача отключена; нажата педаль тормоза; после первого пуска двигателя максимальная скорость автомобиля больше барьера скорости, который должен быть преодолен для разрешения остановки двигателя.

В результате выполнения вышеперечисленных условий формируется бит разрешения останова двигателя. После пуска двигателя бит разрешения останова сбрасывается путем установки сигнала работы электростартера. Если стартер запущен, бит равен 1, и это означает, что разрешение на остановку двигателя не выполняется.

После появления запроса на остановку двигателя, контроллер управления двигателем должен выполнить действия по его остановке, аналогичные выключению замка зажигания. Отличие заключается в том, что время выключения главного реле должно увеличиться до установленной величины. Если по истечении этого времени сигнал на запуск не поступил, то ЭСУД обеспечивает выключение главного реле и дальнейший запуск должен осуществляться поворотом ключа зажигания. Модуль разрешает пуск двигателя.

Для пуска двигателя в режиме «Старт – Стоп» необходимо выполнение следующих условий: режим «Старт – Стоп» включен, с помощью нажатия кнопки; разрешен пуск двигателя в режиме «Старт – Стоп»; рычаг коробки передач находится в положении «нейтраль»; время работы двигателя после остановки менее

порога по времени, ниже которого разрешается старт автомобиля в режиме «Старт – Стоп».

В рамках работы системы, ЭСУД и модуль контроля заряда батареи осуществляет измерение уровня ТАБ, используя вместо модельного параметра определения степени заряда, реально существующий параметр с электронного датчика заряда ТАБ.

Модуль управления генераторной установкой осуществляет оптимизацию уровня выходных параметров тока и напряжения на разных оборотах ДВС с учетом необходимости обеспечения заряда ТАБ, а также питания основных потребителей бортовой системы автомобиля.

Результаты исследования работы электронного регулятора напряжения DC/DC в составе АКЭУ представлены на рисунке 4.30. График стабилизированного напряжения (рисунок 4.30), в сравнении с графиком посадки напряжения в момент пуска ДВС, наглядно показывает достоинства соответствующего комплекса состоящего из интеллектуальной генераторной установки и дополнительного регулятора напряжения.

Результаты исследования DC/DC преобразователя

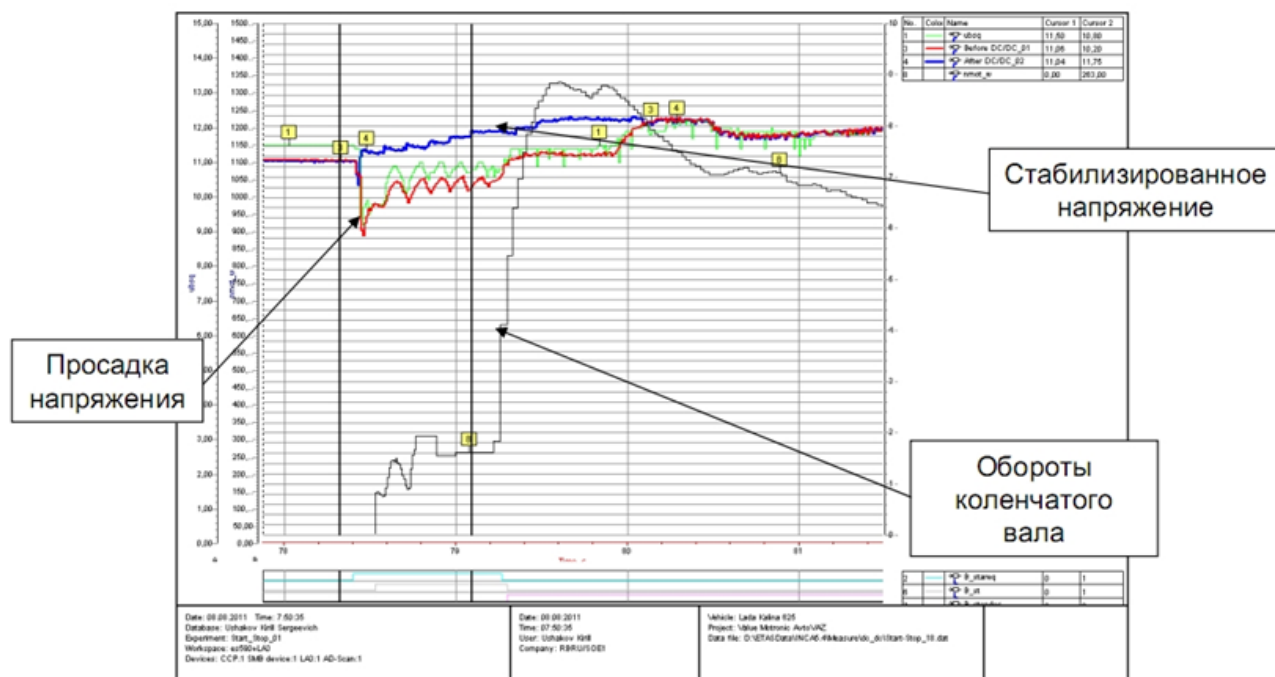


Рисунок 4.30 – Диаграммы исследования работы дополнительного регулятора напряжения

Сравнительный анализ работы автомобиля в режиме пуска с системой «Старт – Стоп» и от ключа зажигания представлен на рисунке 4.31. Анализ диаграммы показывает, что в режиме пуска ДВС у автомобиля с системой «Старт – Стоп» обеспечивается существенное сокращение времени пуска и меньшая просадка напряжения по сравнению с обычной системой управления, за счет установки в систему интеллектуального датчика положения коленчатого вала.



Рисунок 4.31 – Диаграммы реализации режима «быстрый пуск» для автомобиля с системой «Старт – Стоп» и без нее

Обобщенный, сравнительный анализ работы АКЭУ при наличии и отсутствии на борту системы «Старт – Стоп» приведен на рисунке 4.32. Из анализа параметров работы системы (рисунок 4.32) видно, что в случае установки на автомобиле соответствующей электронной системы управления значительно улучшаются пусковые характеристики работы АКЭУ: уменьшается время пуска; падают максимальные обороты ДВС и как следствие снижается объем вредных выбросов.

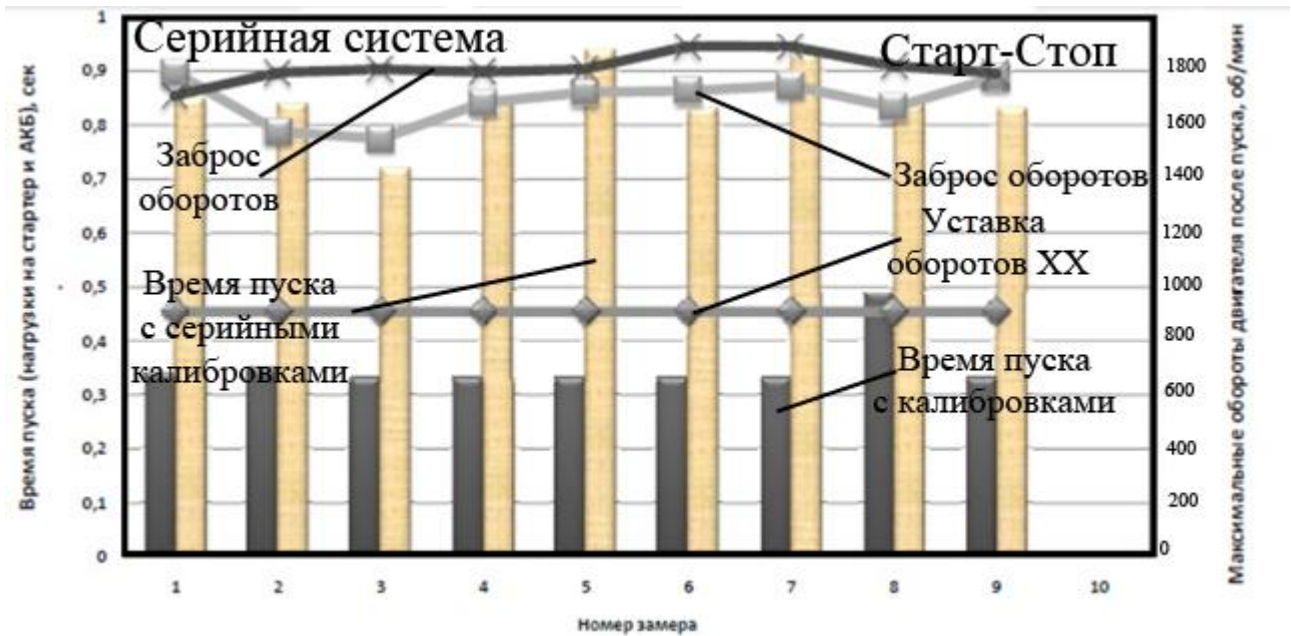


Рисунок 4.32 – Сравнительный анализ параметров работы автомобилей при наличии и отсутствии системы «Старт – Стоп»

4.6 Выводы по главе

Разработка и реализация транспортных комплексов с комбинированной энергоустановкой наиболее эффективна в случае системной интеграции в рамках проектов, соответствующих электронным системам оптимизации работы ДВС. К числу наиболее успешных инструментов проектирования соответствующих управляющих систем относятся компьютерные математические пакеты, к числу которых относится виртуальная среда Matlab, обеспечивающая возможность имитационного моделирования сложных технических объектов и алгоритмов управления.

Основные функции систем управления автомобилями с КЭУ определяются следующим образом: оптимизация работы ДВС по динамическим параметрам и топливной экономичности; снижение объема вредных выбросов в атмосферу; улучшение процессов энергетического баланса.

Реализация соответствующих функций в рамках имитационных моделей, а также физическая реализация систем управления показывает высокую степень

эффективности работы АКЭУ в сравнении с аналогами, не имеющими в составе подобных систем.

Применение в составе электротехнических комплексов современных АТС электронных систем управления параметрами возможен при решении проектных и технологических проблем связанных с созданием интеллектуальных компонентов системы электрооборудования: датчик положения коленчатого вала; дополнительный модуль регулирования напряжения; генераторная установка, датчик уровня зарядки ТАБ (АКБ); электростартер.

Успешная реализация комплексов электрооборудования в ЭМБ и АКЭУ в состав которых входят перспективные исполнительные устройства и системы управления создает предпосылки для перехода автомобильной промышленности на новый технологический уровень развития. Однако, из-за сложности образуемых комплексов, возникает проблема обеспечения требуемого уровня качества и надежности эксплуатации перспективных АТС. Для решения данной проблемы необходимо разработать и внедрить в практику комплекс инженерно-аналитических инструментов способных одинаково эффективно работать как в условиях жизненного цикла традиционных, так и перспективных АТС. Комплекс должен интегрировать в себе новые эффективные инструменты управления качеством и надежностью ЭМБ и АКЭУ разработанные в развитие существующих инструментов управления комплексом электрооборудования автомобилей на основе стандартов ИСО 9001 и ИСО/ТУ 16949.

ГЛАВА 5. МЕТОДЫ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ. КОНЦЕПЦИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭМБ И АКЭУ

5.1 Традиционные модели расчета показателей качества АТС в эксплуатации

Модели расчета показателей качества автомобилей можно условно классифицировать на две группы: традиционные и перспективные. Первая группа моделей отражает достижения отечественной школы аналитики в области измерения качества и надежности автомобилей и охватывает показатели традиционно используемые российскими автопроизводителями [57, 130]. Перспективная группа моделей интегрирует в себе показатели, методология расчета которых используется мировыми лидерами автопрома. В аналитических исследованиях качества автомобилей в эксплуатации, как правило, используются дискретные данные. Они определяют качество функционирования автомобилей в исследуемый временной и пробеговой интервал автомобиля. Как правило, в практике автомобилестроения используются абсолютные и относительные (приведенные) показатели. В таблице 5.1. представлены традиционные модели расчета показателей качества автомобилей в эксплуатации. При рассмотрении таблицы 5.1, необходимо учитывать, что при анализе качества автомобилей в гарантийной эксплуатации можно наблюдать за показателями при росте гарантийного парка (запуск производства нового автомобиля), а также при стабильном выпуске автомобилей определенной марки (рисунок 5.1, 5.2). Таким образом, на рисунках 5.1 и 5.2, модель А отражает запуск производства и соответственного накопление гарантийного парка по новому автомобилю. Модель В отражает стабильный выпуск автомобилей определенной марки.

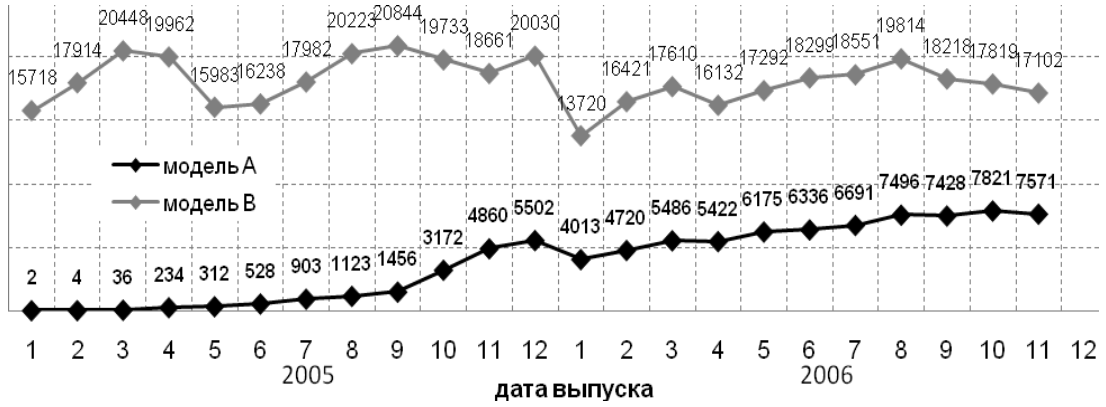


Рисунок 5.1 – Выпуск автомобилей

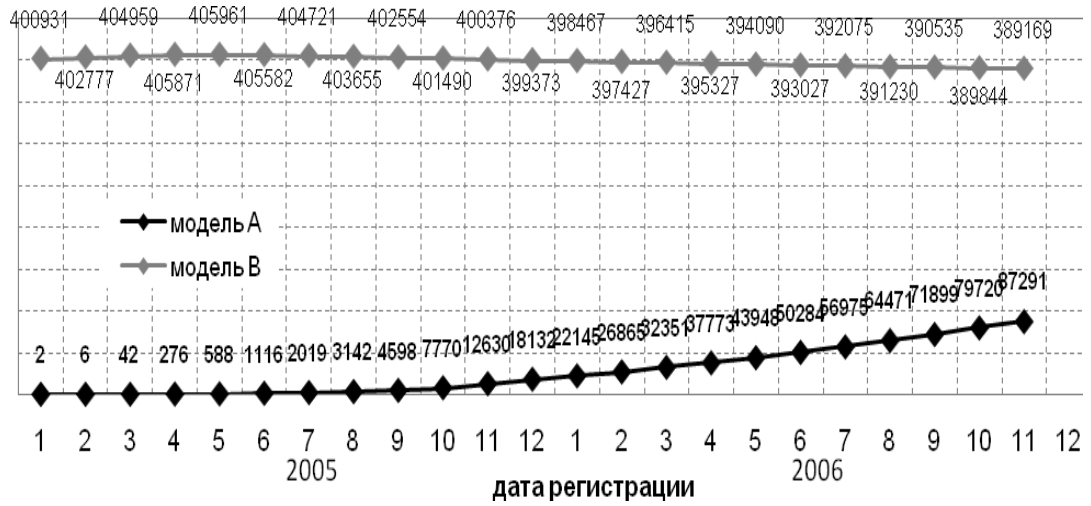


Рисунок 5.2 – Гарантийный парк автомобилей

Таблица 5.1 – Традиционные модели расчета показателей качества автомобилей

Наименование показателя	Временной период	Способ расчета	Применение
1	2	3	4
Модель А Абсолютные показатели (количество отказов, суммарные затраты)	По дате регистрации отказа	-	Используется для назначения целей в области качества и мониторинга их выполнения.
	По дате выпуска изделия	-	Используется для предварительного анализа качества.
Модель В Отказы выпущенного автомобиля	По дате выпуска изделия (по дате продажи)	Отношение количества отказов обнаруженных в автомобилях, выпущенных в течение определенного месяца (x1000) к количеству выпущенных автомобилей в том же месяце.	Используется для анализа изменений качества выпускаемой продукции, оценки эффективности внедренных мероприятий по улучшению показателей качества.
Модель З Отказы зарекомендованного автомобиля	По дате регистрации отказа (показатель компаний J.D.Power & Associates)	Отношение количества отказов за месяц (x1000) к количеству зарекомендованных автомобилей.	Используется для сравнения результатов работы в отчетные периоды времени.
	По дате выпуска автомобилей		Не используется
Модель Г Отказы гарантийного парка автомобилей	По дате регистрации отказа	Отношение количества отказов за месяц (x1000) к величине среднего гарантийного парка.	Используется для сравнения модели изделия, по которой гарантийный парк не заполнен, с моделью, имеющей стабильный размер гарантийного парка.
Модель Н Накопленные отказы гарантийного парка	По дате регистрации отказа	Отношение накопленного количества отказов с даты начала производства (x1000) к величине накопленного гарантийного парка.	Используется для сравнения модели автомобиля, по которой гарантийный парк не заполнен, с моделью, имеющей стабильный размер гарантийного парка.

Проанализируем приведенные в таблице 5.1 модели расчета показателей качества [158].

Модель А. Модель объединяет в группу набор показателей отражающих количественные значения отказов или затрат на автомобили в период гарантийной эксплуатации. Три направления исследования качества АТС с помощью модели А включают: анализ по автомобилям с определенной датой выпуска; анализ по автомобилям с определенной датой продажи; расчет общего количества отказов на определенную дату регистрации в корпоративной информационной системе (ИС).

Количество отказов и суммарные затраты относятся к абсолютным показателям качества автомобиля:.

Число отказов с определенной датой регистрации автомобилей на сервисном предприятии:

$$D^R = \sum_{i=1}^n d_i^R, \quad (5.1)$$

где i – номер отчетных суток для анализа ($i=1 \dots n$),

d_i^R – отказы зарегистрированные в i -е отчетные сутки.

Число отказов по определенной дате выпуска автомобилей

$$D^V = \sum_{i=1}^n d_i^V, \quad (5.2)$$

где d_i^V – число отказов с датой регистрации по i -м отчетным суткам выпуска автомобилей.

Суммарные затраты определяются по формуле:

$$Z = Z_y + Z_z + Z_m, \quad (5.3)$$

где Z_y – сумма затрат связанных с услугами;

Z_z – сумма затрат связанных с запасными частями;

Z_m – сумма затрат связанных с расходными материалами.

Сумма затрат по отказам с определенной датой регистрации

$$Z^R = \sum_{i=1}^n z_i^R, \quad (5.4)$$

где z_i^R – затраты с регистрацией в i -е отчетные сутки.

Сумма затрат на ремонт автомобилей с определенной датой выпуска:

$$Z^V = \sum_{i=1}^n z_i^V, \quad (5.5)$$

где z_i^V – затраты с на ремонт по автомобилям с определенным i – м отчетным суткам выпуска.

Модель В. Уровень отказов по автомобилям с определенной датой выпуска (\bar{D}^V). Показатель (рисунок .5.3) определяется по формуле:

$$\bar{D}^V = \frac{D^V}{V} \times 1000, \quad (5.6)$$

где D^V – число зарегистрированных отказов по автомобилям, с выпуском в течение определенного месяца, с учетом заданного периода эксплуатации;

V – общее число выпуска автомобилей в исследуемом месяце.

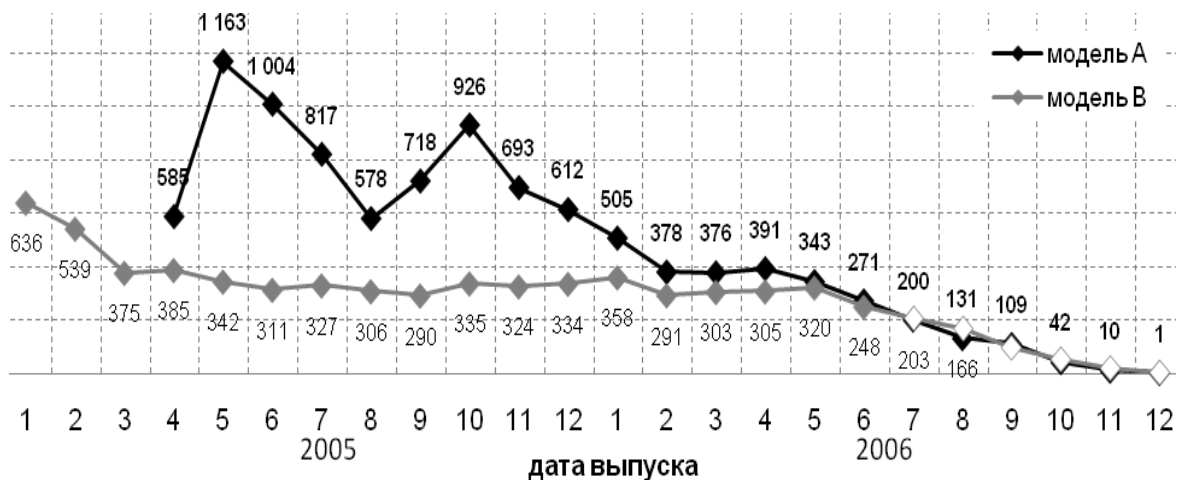


Рисунок 5.3 – Отказы по дате выпуска изделия

Данный показатель имеет высокий уровень информативности в течении короткого промежутка времени. Его используют для анализа эффективности мероприятий в области качества.

Модель 3. Показатель отказов зарекламированного автомобиля (\bar{D}^A) рассчитывается по формуле

$$\bar{D}^A = \frac{D^R}{A} \times 1000, \quad (5.7)$$

где D^R – общее число отказов автомобилей за определенный месяц;

A – число автомобилей зарекламированных в том же месяце.

Показатель отражает усредненное число отказов на один автомобиль.

Данный показатель имеет меньшую чувствительность, чем предыдущий. Время его реакции - до 18 месяцев. При этом он применяется компанией Западными компаниями, такими как J.D.Power & Associates для исследования качества автомобилей в эксплуатации.

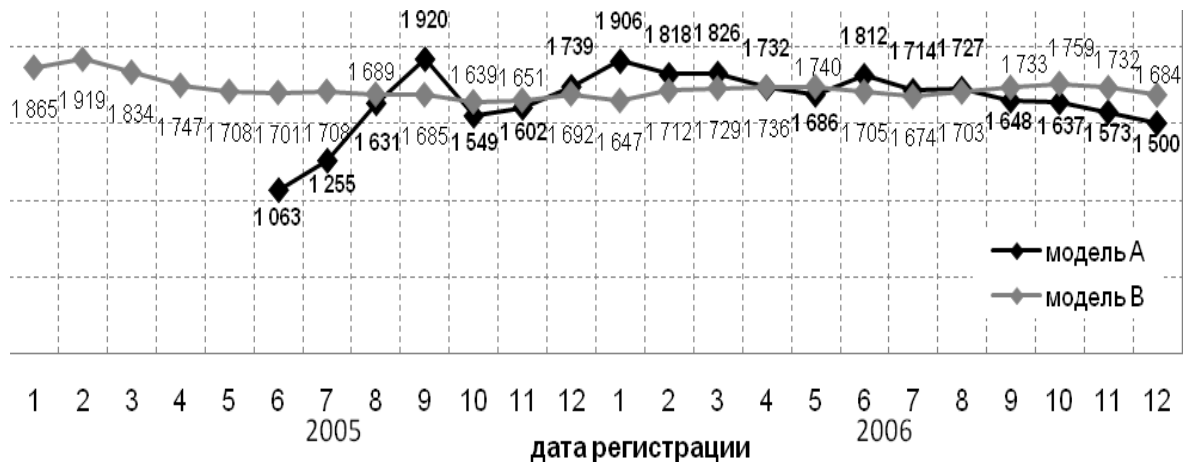


Рисунок 5.4 – Отказы зарекламированного автомобиля

Модель Г. Показатель (рисунок 5.5) отказы гарантийного парка автомобилей (\overline{D}^S) определяется по формуле:

$$\overline{D}^S = \frac{D^R}{S} \times 1000, \quad (5.8)$$

где D^R – суммарное число отказов в течение определенного месяца;

S – парк автомобилей состоящих на гарантии в исследуемом месяце.

Величина S определяется суммой отправленных на сервисные предприятия автомобилей для продажи. С обязательной реализацией гарантийных требований автопроизводителя на момент проведения расчета.

Данный показатель не всегда надежен, он связан с изменением гарантийного парка, а также обязательств автопроизводителя. Можно использовать при стабильных программах выпуска и соответствующей характеристике гарантийного парка.

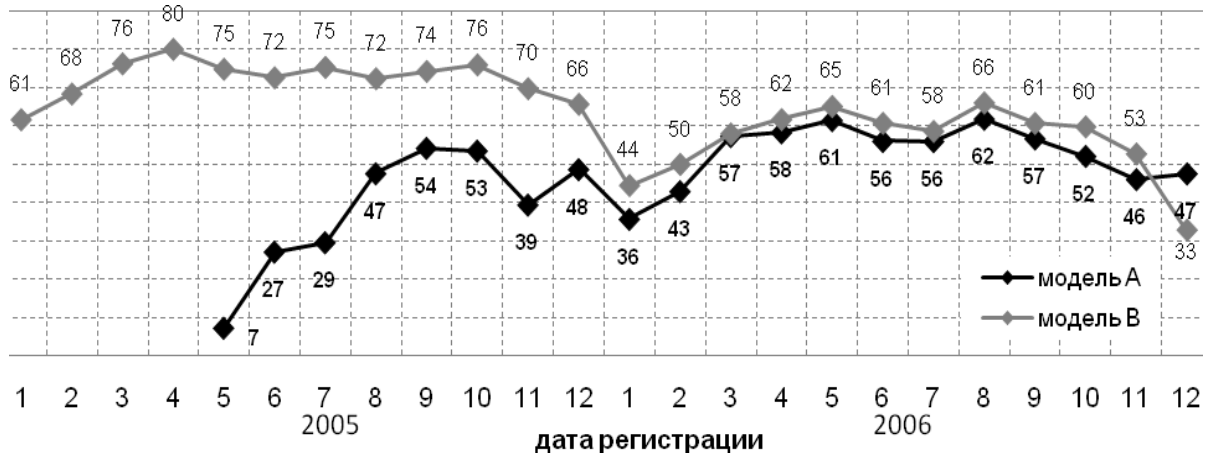


Рисунок 5.5 – Отказы парка автомобилей, состоящих на гарантии.

Модель Н. Накопленные отказы гарантийных автомобилей (рисунок 5.6):

$$\bar{D}_n^R = \frac{D_n^R}{S_n} \times 1000, \quad (5.9)$$

где D_n^R – накопленное количество отказов с начала производства;

S_n – накопленный гарантийный парк.

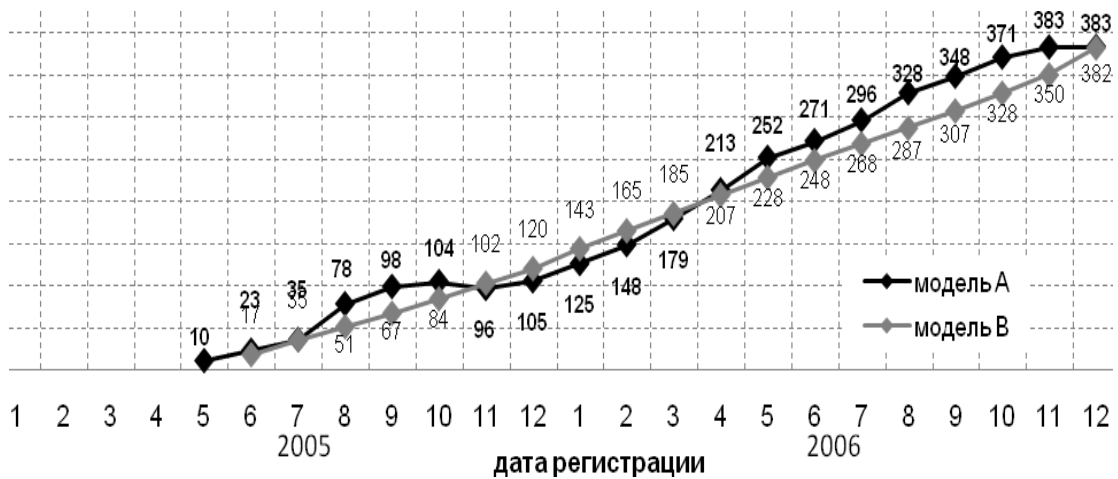


Рисунок 5.6 – Накопленные отказы гарантийного парка

S_n определяется количеством гарантийных автомобилей на момент проведения расчета.

5.2 Перспективные модели расчета показателей качества ЭМБ и АКЭУ

Перспективные модели расчета качества ЭМБ и АКЭУ в гарантийной эксплуатации (таблица 5.2) представляют собой производные от модели GMF (качество в гарантии по группе месяцев эксплуатации) [143].

Таблица 5.2 – Перспективные модели расчета показателей качества ЭМБ и АКЭУ

Наименование показателя	Временной период	Метод расчета	Применимость
Модель IPTV. Отказы по группе месяцев наблюдения	По дате выпуска ЭМБ и АКЭУ (по дате продажи).	Количество отказов на 1000 проданных ЭМБ и АКЭУ	Для анализа тренда отказов по месяцам продажи (от 0 до 36 и т.д.)
Модель IRVO. Блокирующие отказы по группе месяцев наблюдения	По дате выпуска ЭМБ и АКЭУ (по дате продажи).	Количество блокирующих отказов на 1000 проданных ЭМБ и АКЭУ по группе месяцев анализа	Для анализа тренда блокирующих отказов продукции (от 0 до 36 месяцев и т.д.)
Модель с/v. Уровень затрат по группе месяцев наблюдения	По дате выпуска ЭМБ и АКЭУ .	Уровень затрат в руб. на устранение отказов в эксплуатации на 1000 проданных ЭМБ и АКЭУ по группе месяцев анализа	Для анализа тренда затрат на устранение отказов ЭМБ и АКЭУ в эксплуатации (от 0 до 36 месяцев и т.д.)
Модель PDI. Отказы выявленные на этапе предпродажной подготовки ЭМБ и АКЭУ	По дате выпуска ЭМБ и АКЭУ (по дате продажи).	Количество отказов на 1000 автомобилей выявленных на этапе предпродажной подготовки.	Используется для анализа динамики отказов продукции перед продажей потребителям
Модель TSG. Отказы по группе недель наблюдения	По дате выпуска ЭМБ и АКЭУ (по дате продажи).	Количество отказов на ЭМБ и АКЭУ выявленных в течении первых месяцев эксплуатации.	Используется для оперативного анализа динамики отказов продукции в течении первых месяцев эксплуатации.

В классическом варианте, который используется передовыми автопроизводителями расчет GMF проводится по формуле

$$GMF\%_i = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{N} \cdot 1000, \quad (5.10)$$

где $GMF\%_i$ – количество отказов в ЭМБ и АКЭУ известного месяца производства с i - м месяцем эксплуатации, приходящееся на 1000 автомобилей;

Q_i – количество накопленных отказов для каждой из систем ЭМБ и АКЭУ;

N – общее количество исследуемых ЭМБ и АКЭУ, за данный период.

Модель IPTV. Количество отказов по группе месяцев анализа на 1000 проданных автомобилей ($K\%$) рассчитывается по формуле

$$K\%_B(MIS) = 1000 \times \sum_{i=0}^{i=MIS} k_i, \quad (5.11)$$

где k_i - отношение количества отказов к числу проданных ЭМБ и АКЭУ по месяцам;

MIS – (month in service) месяц гарантии, на котором потребовался гарантийный ремонт.

Блок схема расчета показателя представлена на рисунке 5.7. Она имеет принципиальное значение, поскольку расчет остальных перспективных моделей, кроме PDI (уровень качества на этапе предпродажной подготовки), базируется на данном показателе [158].

На рисунке 5.8 представлен пример реализации графика изменения показателя IPTV при анализе качества ЭМБ и АКЭУ по 1, 3, 6, 12 месяцам эксплуатации с заданной датой выпуска. На графиках (рисунок 5.8) последние точки, из-за неустойчивости показателя при первых пересчетах, выделены штриховой линией. Практика показывает, что уровень показателя стабилизируется после третьего пересчета IPTV. Процесс стабилизации показателя IPTV продемонстрирован на рисунке 5.9.

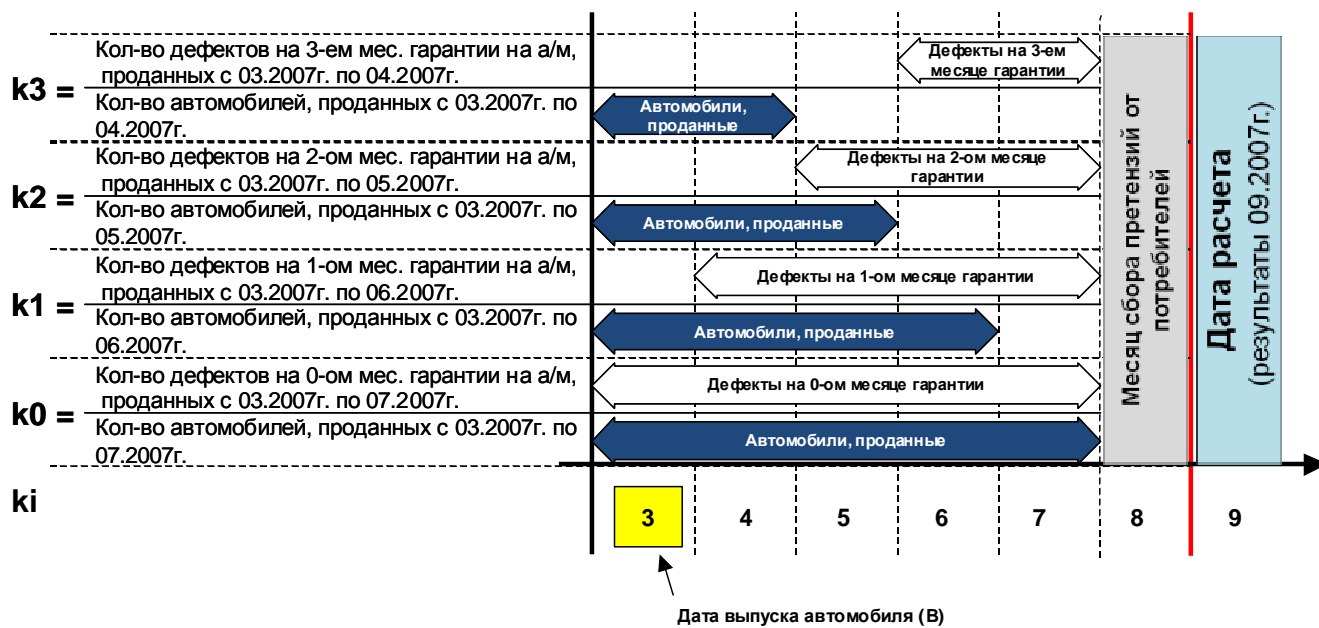


Рисунок 5.7 – Блок схема расчета показателя IPTV

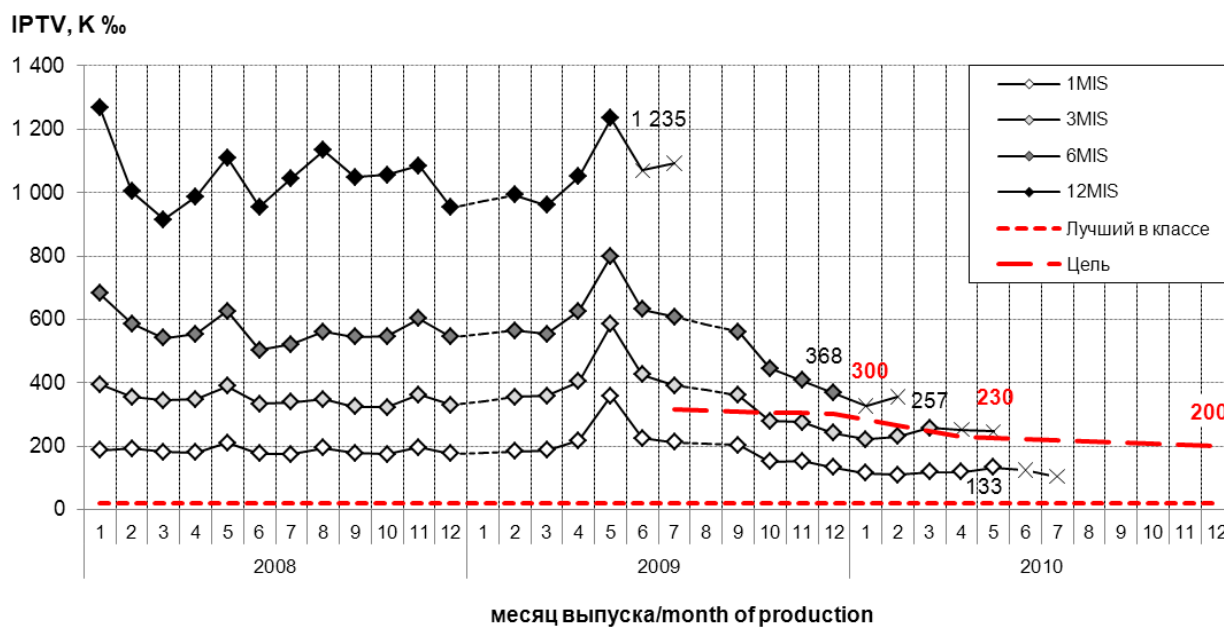


Рисунок 5.8 – Пример реализации графика IPTV

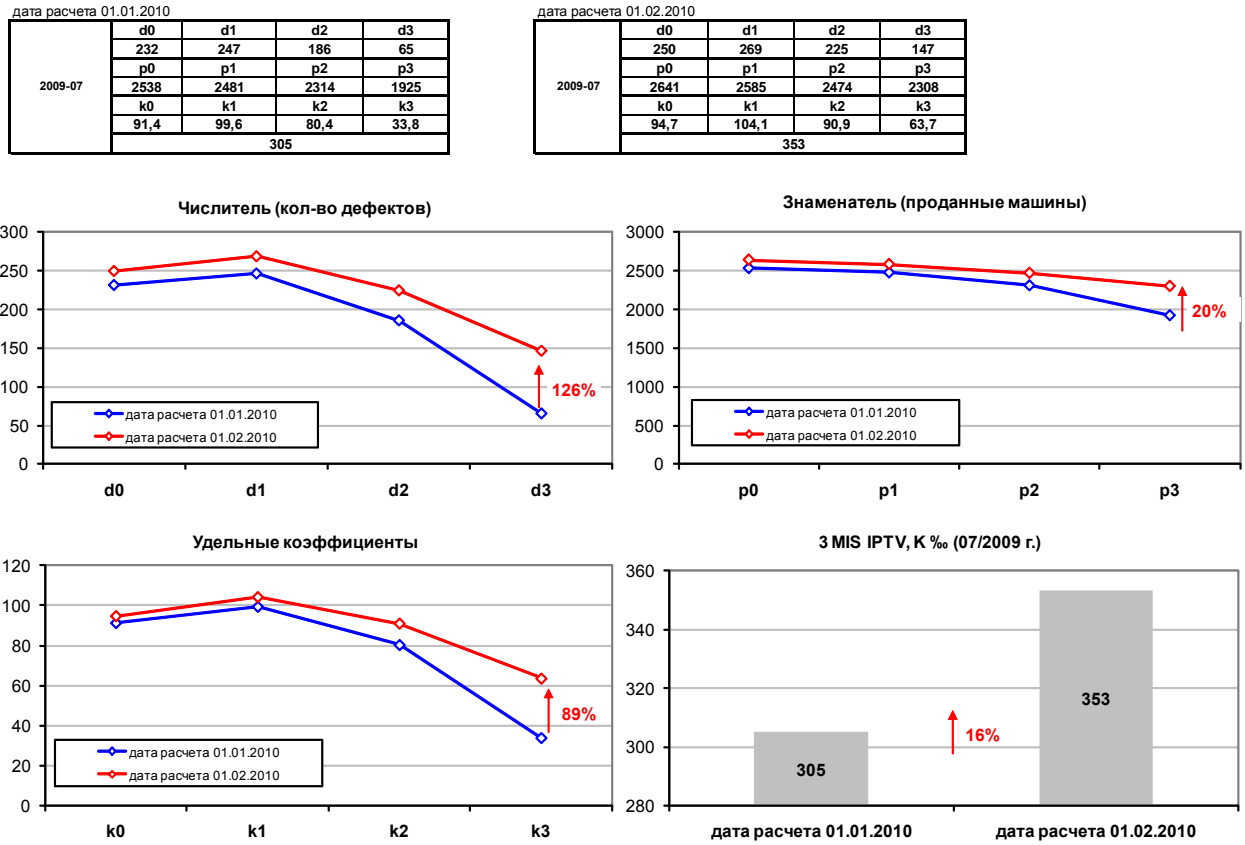


Рисунок 5.9 – Процесс стабилизации показателя IPTV

Модель IRVO. Уровень блокирующих отказов по месяцу эксплуатации. Блокирующие отказы – это отказы, при возникновении которых эксплуатация запрещена или невозможна (безопасность, функциональность).

Расчет показателя IRVO (R%) проводится по формуле

$$R\%_{\text{B}}(MIS) = 1000 \times \sum_{i=0}^{i=MIS} r_i, \tag{5.12}$$

где, r_i – отношение количества блокирующих отказов по месяцам к количеству проданных ЭМБ и АКЭУ;

На рисунке 5.10 представлен пример графика изменения показателя IRVO.

IRVO IPTV, R ‰

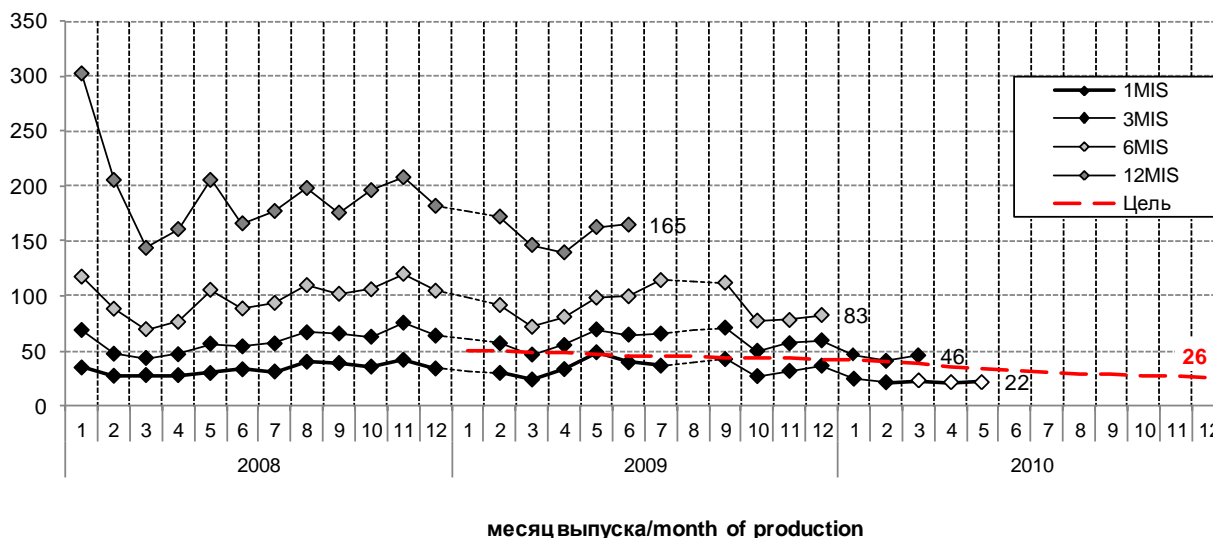


Рисунок 5.10 – Пример реализации графика изменения показателя IRVO

Как было показано выше, отказы IRVO представляют собой спектр отказов при возникновении которых эксплуатация ЭМБ и АКЭУ невозможна. Существует два пути определения перечня таких отказов:

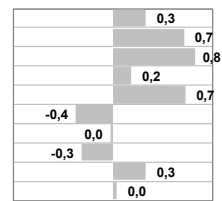
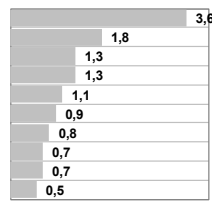
1 конструкторская служба предприятия автопроизводителя самостоятельно определяет перечень отказов, при возникновении которых эксплуатация ЭМБ и АКЭУ невозможна или запрещена правилами безопасности;

2 служба качества предприятия проводит анкетирование потребителей эксплуатирующих определенную модель ЭМБ и АКЭУ на предмет определения перечня отказов, которые, по мнению потребителей, могут привести к невозможности эксплуатации ЭМБ и АКЭУ.

В качестве примера представляем диаграмму сравнения уровня IRVO для ТОПовой группы отказов ЭМБ и АКЭУ (рисунок 5.11).

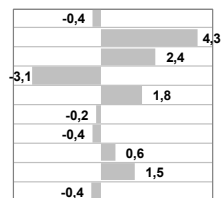
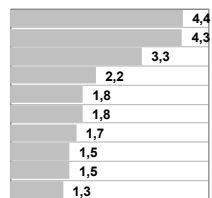
ТОП 10 IRVO 1MIS IPTV, К%

Код дефекта	Наименование дефекта	апр.10	май.10	изм.
1 8101200-000-000	дефект подводящего шланга отопителя	3,22	3,55	0,34
2 8101204-000-000	дефект отводящего шланга отопителя	1,13	1,84	0,72
3 1148038-031-000	разрыв шланга системы охлаждения	0,48	1,32	0,83
4 5205015-025-000	не работает электродвигатель стеклоочис	1,13	1,32	0,19
5 1303010-086-000	не закреплен отводящий шланг к радиатор	0,32	1,05	0,73
6 3510006-024-000	негерметичность вакуумного усилителя тор	1,29	0,92	-0,36
7 1012005-057-000	дефект масляного филь тра (течь по завал)	0,80	0,79	-0,01
8 3701010-145-000	отсутствует ток отдачи генератора	0,97	0,66	-0,31
9 3709340-000-000	дефект переключателя стеклоочистителя	0,32	0,66	0,34
10 1300010-024-000	негерметичность радиатора	0,48	0,53	0,04



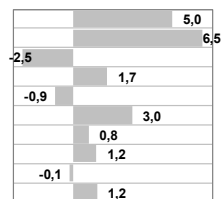
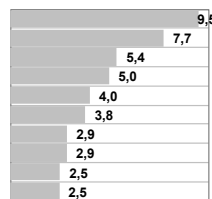
ТОП 10 IRVO 3MIS IPTV, К%

Код дефекта	Наименование дефекта	фев.10	мар.10	изм.
1 3510006-024-000	негерметичность вакуумного усилителя тор	4,73	4,35	-0,38
2 8101200-000-000	дефект подводящего шланга отопителя	0,00	4,34	4,34
3 3510006-057-000	подклинивание вакуумного усилителя	0,88	3,33	2,44
4 5205015-025-000	не работает электродвигатель стеклоочис	5,29	2,17	-3,12
5 8101204-000-000	дефект отводящего шланга отопителя	0,00	1,84	1,84
6 1703055-030-000	разрушение 061 рычага выбора передач	2,05	1,83	-0,22
7 3450008-025-000	не работает электродвигатель р/управлен	2,06	1,67	-0,39
8 8101050-024-000	течь радиатора отопителя	0,88	1,50	0,62
9 1303010-086-000	не закреплен отводящий шланг к радиатор	0,00	1,50	1,50
10 3709330-000-000	дефект переключателя световых сигналов	1,77	1,33	-0,43



ТОП 10 IRVO 6MIS IPTV, К%

Код дефекта	Наименование дефекта	ноя.09	дек.09	изм.
1 5205015-025-000	не работает электродвигатель стеклоочис	4,51	9,51	5,00
2 1148038-031-000	разрыв шланга системы охлаждения	1,23	7,74	6,52
3 3450008-025-000	не работает электродвигатель р/управлен	7,89	5,39	-2,50
4 1703055-030-000	разрушение 061 рычага выбора передач	3,25	4,99	1,75
5 3701010-145-000	отсутствует ток отдачи генератора	4,90	4,02	-0,88
6 1139009-071-000	не создает давление электробензонасос	0,82	3,80	2,98
7 1006033-024-000	попадание масла в свечные колодцы	2,06	2,87	0,81
8 3510006-024-000	негерметичность вакуумного усилителя тор	1,65	2,86	1,21
9 1300010-024-000	негерметичность радиатора	2,65	2,51	-0,14
10 8101050-024-000	течь радиатора отопителя	1,24	2,47	1,23



ТОП 10 IRVO 12MIS IPTV, К%

Код дефекта	Наименование дефекта	май.09	июн.09	изм.
1 5208009-025-000	не работает эл двиг насоса омывателя	25,15	26,25	1,11
2 3450008-025-000	не работает электродвигатель р/управлен	7,03	13,43	6,41
3 1006033-024-000	попадание масла в свечные колодцы	7,70	9,88	2,18
4 3510006-024-000	негерметичность вакуумного усилителя тор	2,84	8,93	6,09
5 1041020-033-000	расслоение ремня привода	4,22	8,51	4,29
6 3701010-145-000	отсутствует ток отдачи генератора	4,19	8,10	3,91
7 3705010-025-001	не работает индивидуальная катушка зажигания	15,05	7,11	-7,94
8 5205015-025-000	не работает электродвигатель стеклоочис	6,35	5,95	-0,41
9 1300010-024-000	негерметичность радиатора	4,29	5,77	1,48
10 1703055-030-000	разрушение 061 рычага выбора передач	9,66	4,82	-4,84

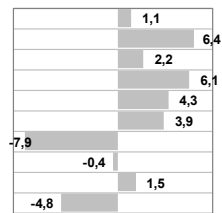
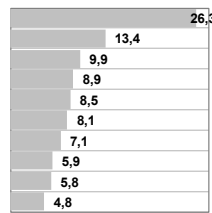


Рисунок 5.12 – Диаграмма сравнения уровня IRVO

Модель с/в. Показатель ремонтпригодности с/в, определяет уровень затрат на устранение отказов по ЭМБ и АКЭУ с установленным сроком эксплуатации.

Расчет показателя проводится по формуле

$$Z\%_{0B}(MIS) = 1000 \times \sum_{i=0}^{i=MIS} z_i, \quad (5.13)$$

где, z_i – коэффициент отражающий отношение затрат на устранение отказов к количеству проданных ЭМБ и АКЭУ по месяцам.

На рисунке 5.13 представлен пример графика динамики изменения показателя с/в.

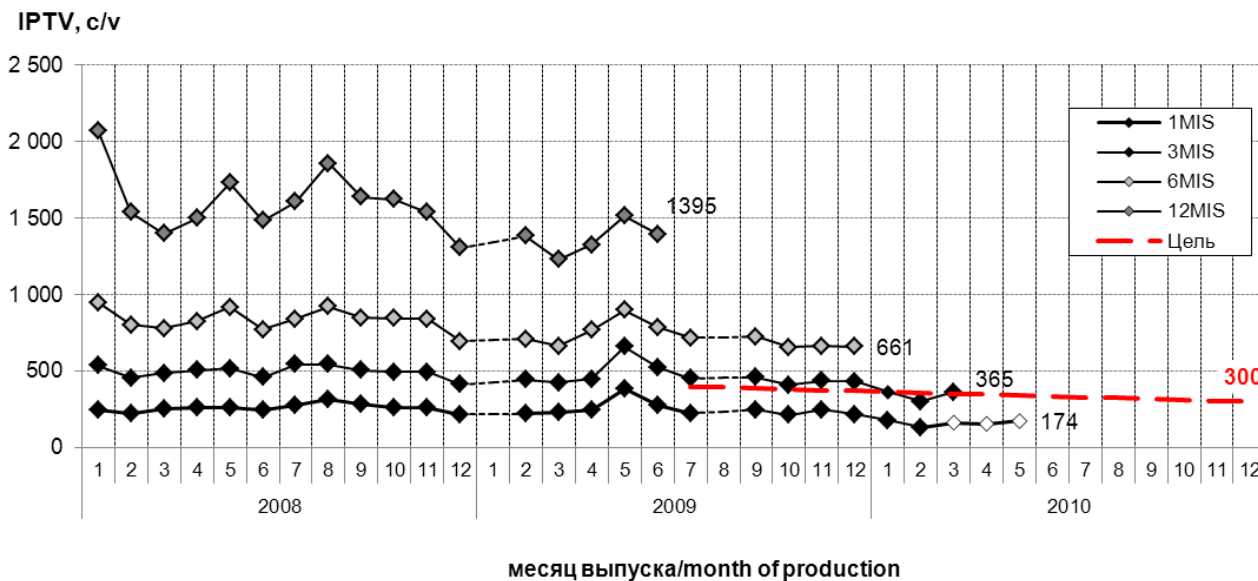


Рисунок 5.13 – График динамики изменения показателя с/в

Пример диаграммы, отражающей изменение уровня затрат (с/в) по спектру ТОПовой группы позиций представлен на рисунке 5.14.



Рисунок 5.14 – Диаграмма изменения затрат по ТОПовой группе отказов

Модель PDI. Уровень отказов выявленных на предпродажной подготовке. Количественный показатель представляет собой отношение числа отказов выявленных на этапе предпродажной подготовки (ППП) к числу ЭМБ и АКЭУ прошедших ППП, имеющих заданную дату выпуска, приведенный к 1000 автомобилей

$$P\%_{0i} = \frac{\sum_{i=1}^n Y}{N} \cdot 1000 \quad (5.14)$$

где $Y\%$ – количество отказов в ЭМБ и АКЭУ известного месяца производства выявленных на предпродажной подготовке.

На рисунке 5.15 представлен график изменения показателя PDI.

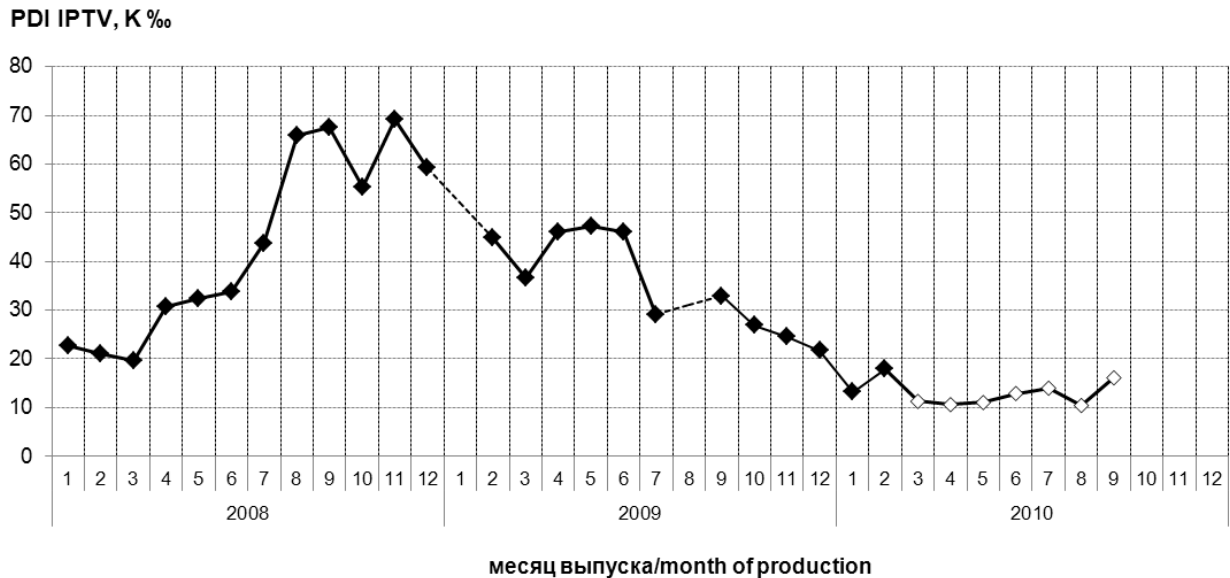


Рисунок 5.15 – График динамики изменения показателя PDI

Модель TSG [130]. Тревожные сигналы в гарантии (TSG) представляют собой совокупность показателей отражающих количество отказов по каждой из позиций кодификатора дефекта по каждой из 10 первых недель эксплуатации ЭМБ и АКЭУ.

На рисунке 5.16 представлена диаграмма тревог. В случае резкого увеличения показателя накопленных по первым неделям эксплуатации отказов на ЭМБ и АКЭУ с заданной датой выпуска, с 3-х кратным превышением границы допустимого уровня, объявляется тревога по данной номенклатуре. С этого момента начинается реализация алгоритма действий по устранению отказов в эксплуатации, устранению несоответствий в производстве или в конструкции ЭМБ и АКЭУ. При этом возможна реализация процедуры индивидуального отзыва ЭМБ и АКЭУ из гарантийной эксплуатации.

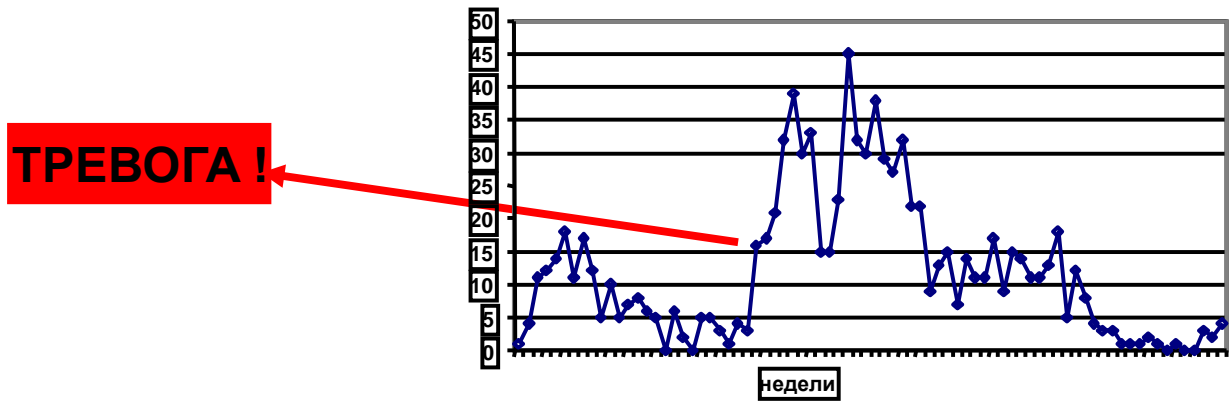
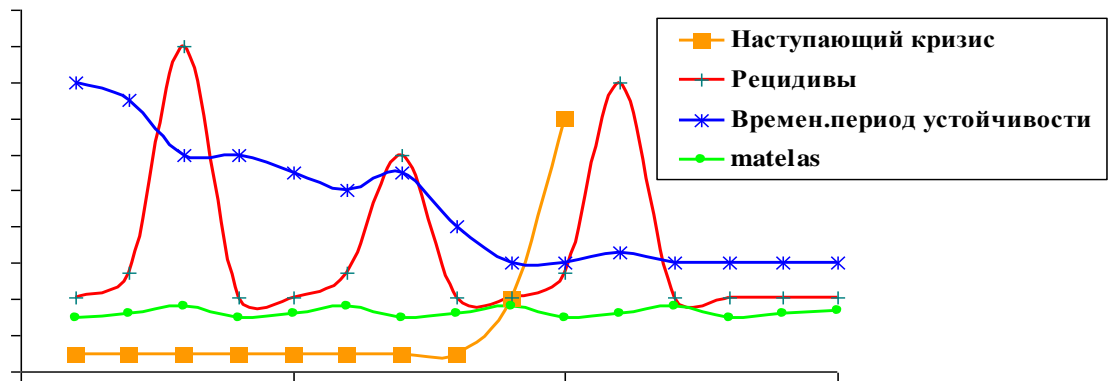


Рисунок 5.16 – Диаграмма реализации функции тревоги в эксплуатации ЭМБ и АКЭУ

На рисунке 5.17 представлены наиболее типичные случаи при анализе диаграммы тревог.



1. Наступающие кризис.
2. Рецидивы после обработки.
3. Недостаточная обработка (временный период устойчивости).
4. Слабый уровень постоянного сигнала.

Рисунок 5.17 – Примеры анализа диаграммы тревог

5.3 Комплексы анкетных исследований воспринимаемого качества автомобилей в эксплуатации

Автомобильная промышленность, во многих направлениях своей деятельности, является бесспорным лидером внедрения инновационных технологий и инструментов управления. Благодаря успехам лидеров автопрома в практику предприятий других отраслей вошли инструменты управления качеством, и в частно-

сти аналитические инструменты мониторинга и прогнозирования качества продукции и услуг. Объективно, крупные корпорации автомобильной отрасли, занимаются формированием и развитием систем корпоративных требований имеющих ключевое влияние на предприятия производителей автокомпонентов и автосервиса. Они задают высокий уровень стандартов в области управления качеством и генерируют инструменты, представляющие собой новые направления в области повышения эффективности управления процессами [132, 150].

На наш взгляд одним из наиболее важных, в развитии инструментов управления качеством, в настоящее время, является аналитический сектор мониторинга и прогнозирования. Здесь, благодаря информационным технологиям и межфункциональному подходу на экспертном уровне, происходит формирование инструментов измерения воспринимаемого качества продукции и услуг, реализуемых на основе комплексов анкетных исследований, которые в свою очередь обеспечивают развитие методологии стратегического планирования предприятия в рамках процессов комплексной оценки качества.

Воспринимаемое качество продукции необходимо рассматривать как оценку качества, воспринимаемую глазами потребителей. Именно эта оценка сегодня считается наиболее актуальной. Она реализуется в виде целой системы корпоративных стандартов определяющих подходы к измерению качества на всех этапах жизненного цикла ЭМБ и АКЭУ [150].

В представленной главе приведены результаты исследования и разработки анкетных комплексов, реализующих функцию оценки удовлетворенности потребителей качеством автомобилей в эксплуатационный период жизненного цикла [134].

Оценка воспринимаемого качества продукции, компаниями мировыми лидерами, измеряется с 70-х годов 20 века, на российских предприятиях этот процесс стартовал в 2000-х годах.

Традиционно более высокий уровень конкуренции сложившийся на «западном» рынке, а также соответствующее обеспечение надежности автомобилей на этапах жизненного цикла, предопределили значительное развитие методологии

анкетных исследований у лидеров мирового автопрома. Действительно, крупнейшие компании справедливо считают, что интеграция оценок удовлетворенности потребителей и надежности ЭМБ и АКЭУ обеспечивает формирование наиболее полных выводов о текущем уровне конкурентоспособности предприятия с точки зрения качества. Реализация аналитических инструментов измерения качества, через широкий спектр информационных источников, создает предпосылки для более обоснованного планирования качества продукции и услуг в оперативном и стратегическом периодах. Весомым аргументом в поддержку комплекса анкетных исследований, является и то, что в условиях постоянного улучшения показателей надежности автомобилей, которое мы наблюдаем последние 20 – 30 лет, производители добились значительных успехов в вопросах обеспечения безотказности. В качестве примера на рисунке 5.18, представлены диаграммы отражающие улучшение надежности продукции одного из лидеров мировой автомобильной промышленности во временном отрезке с 2003 по 2011 гг. Естественно, что потребитель при этом более пристально начинает обращать внимание на вопросы функциональности, комфорта, эмоциональные характеристики продукции. Традиционные источники информации автомобильных концернов, реализующие связи через предприятия сервисной сети, ориентированы только на регистрацию отказов автомобильной техники. Но даже в этом случае ряд проблем связанных с надежностью попросту выпадает из рассмотрения, и в первую очередь это касается изделий не входящих в перечень заменяемых в соответствии с гарантийными обязательствами, например лампочки или свечи зажигания.

Таким образом, вскрывается проблема, связанная с недостаточно полным уровнем данных отражающих вопросы качества ЭМБ и АКЭУ в процессе эксплуатации, получаемых из традиционных источников. При этом значимость и эффективность работы с потребителями на всех уровнях, в условиях жесткой конкурентной борьбы, сегодня и в ближайшей перспективе определит конкурентоспособность предприятий автомобильной промышленности [158].

В настоящее время, безотказность автомобилей российских марок не в достаточной степени соответствует мировому уровню. Но этот уровень достигим. В

то же время, методологическая база анкетных комплексов для традиционных российских марок либо не доступна, либо развивается не так динамично как на «западе». Отсюда, еще одна важная проблема, заключающаяся в необходимости разработки и реализации современных анкетных комплексов, соответствующих лучшему международному опыту, для российских предприятий автомобильной промышленности.

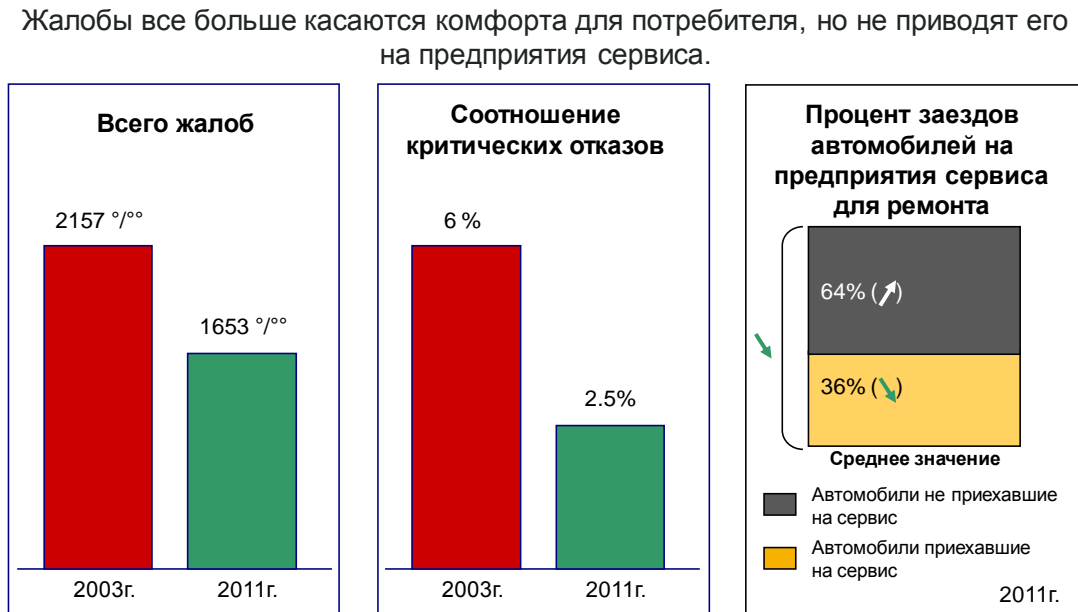


Рисунок 5.18 – Тенденции улучшения надежности автомобилей в эксплуатации

По сути, рассматривая опыт традиционных российских производителей, можно сказать, что спектр работ по оценке воспринимаемого качества продукции, в лучшем случае, ограничивается проведением одного соответствующего исследования в год (рисунок 5.19). При этом целевой функцией исследования является количественная бальная оценка общей удовлетворенности потребителей качеством продукции и услуг. При широком перечне аспектов измерения удовлетворенности потребителей (рисунок 5.19), очевидными недостатками такого анкетного комплекса являются бедная качественная область в опросной базе, а также отдаленность бальной оценки от количественных показателей, которые используются в аналитическом мониторинге качества ЭМБ и АКЭУ в эксплуатации. Последний аспект, в значительной степени усложняет совместный анализ данных об отказах ЭМБ, АКЭУ и удовлетворенности потребителей. Если смотреть дальше, то отсут-

ствие возможности сопоставления информации из разных источников делает невозможным процесс разработки стратегии развития предприятия в области качества, основанной на потребительской удовлетворенности, которая в настоящее время стала фундаментом планирования конкурентоспособности для лидеров рынка [134].

Исследование удовлетворенность потребителей. Традиционный подход.

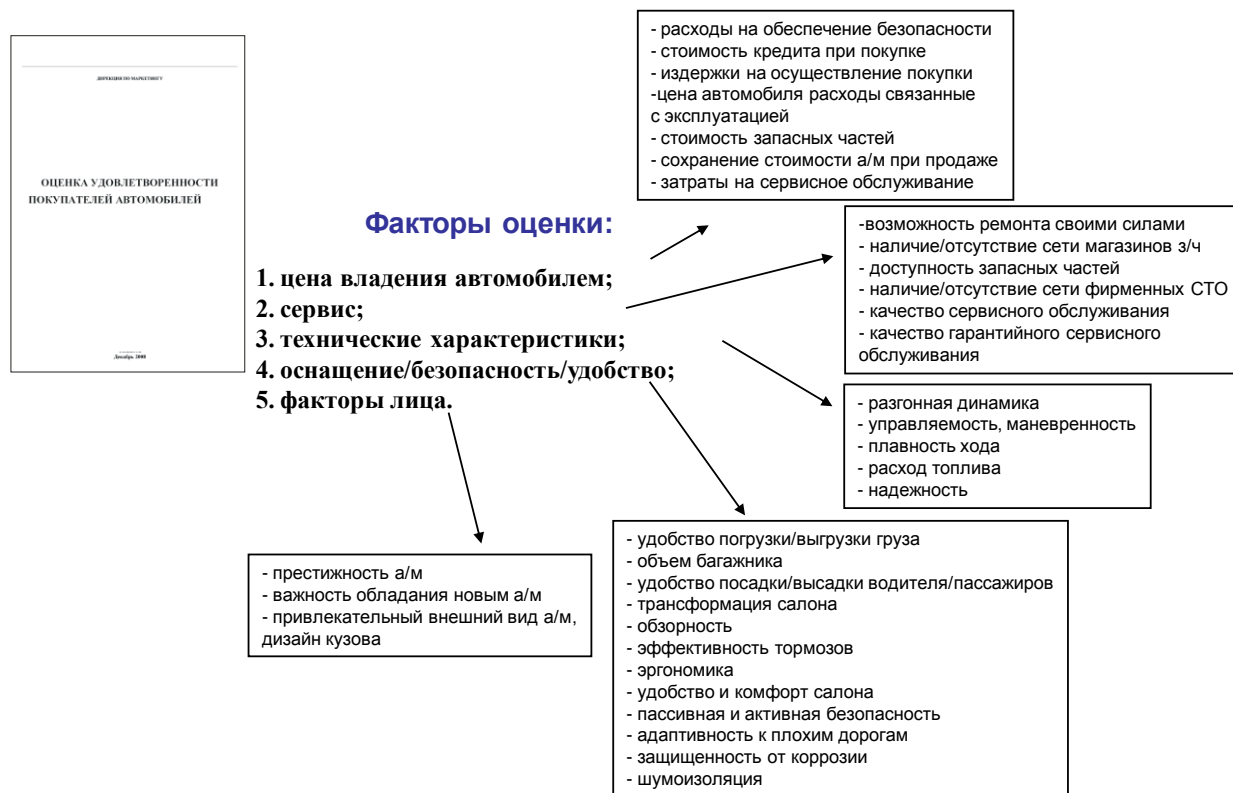


Рисунок 5.19 – Традиционный анкетный комплекс исследования удовлетворенности потребителей

В условиях, когда для многих российских предприятий статистика отказов продукции в период эксплуатации, является единственной доминантой в вопросах планирования качества, говорить об эффективности процесса стратегического развития конкурентоспособности, да и о полноценной реализации одного из основополагающих принципов менеджмента качества – ориентации на потребителей, нужно очень осторожно.

Решение выделенных проблем, на наш взгляд, заключается в необходимости организации системы совместных исследований надежности и воспринимаемого качества ЭМБ и АКЭУ в рамках единых анкетных комплексов, на основе

единой методологии и сходных по физическому смыслу показателей [150]. При этом результаты работы по оценке удовлетворенности потребителей перестанут рассматриваться со стороны некоторых представителей высшего руководства предприятий, как нечто не связанное с конкурентоспособностью. В качестве доказательства, последнего утверждения, приведем диаграмму раскрывающую связь между бальной оценкой удовлетворенности потребителей воспринимаемым качеством и количеством проблем, с которыми они столкнулись в течение первого года эксплуатации автомобилей, построенную на основе результатов реализации перспективного анкетного комплекса (рисунок 5.20).



Рисунок 5.20 – Диаграмма изменения бальной оценки удовлетворенности потребителей в зависимости количества проблем регистрируемых в процессе эксплуатации автомобилей

Из диаграммы рисунка 5.20 видно, что с ростом проблем, бальная оценка удовлетворенности существенно снижается. Если, количество их превышает единицу, можно говорить о переходе оценки из зоны лояльности (9 – 10 баллов) в зону безразличия (7 – 8 баллов). Если, количество проблем больше двух – оценка переходит в зону неудовлетворенности (0 – 6 баллов). Здесь нужно отметить, что для потребителя, в некотором смысле, безразлично, привела ли его проблема на

сервисное предприятие для устранения отказа, или эта проблема связана, например, с неудобством эксплуатации ЭМБ и АКЭУ. В любом случае, снижение оценки удовлетворенности, создает угрозу потери клиента для предприятия в перспективе.

Организацию и проведение совместных исследований в области надежности и удовлетворенности потребителей воспринимаемым качеством ЭМБ и АКЭУ, следует реализовывать в двух ключевых направлениях (рисунок 5.21): модернизация системы количественных показателей надежности автомобилей в процессе эксплуатации, используемой на предприятии, исходя из возможности совместного использования с показателями удовлетворенности потребителей воспринимаемым качеством продукции; разработка и внедрение анкет интегрирующих в себе возможности глубокого количественно-качественного анализа на основе бальной оценки удовлетворенности потребителей, широкой во всех смыслах качественной области вопросной базы, а также внедрения нового количественного показателя способного обеспечить процесс исследования сходимости информации об удовлетворенности с данными регистрируемыми при устранении отказов на предприятиях сервиса.

Относительно первого направления работы, можно отметить, что традиционно на многих российских предприятиях действует система показателей качества автомобилей в эксплуатации, которая привязывается к усредненному гарантийному парку. В этом плане, переход показателей на новую платформу, обеспечивающую приведение уровня отказов ЭМБ и АКЭУ к месяцу производства или продажи решает три задачи:

1 уменьшение погрешности в расчете показателей качества ЭМБ и АКЭУ в эксплуатации. Достигается за счет снятия с рассмотрения (в контексте данной методологии расчета) количественного значения объема гарантийного парка как многофакторного показателя, в котором сложно учитываются объемы выпуска на рынок новых ЭМБ и АКЭУ и выход их за пределы гарантийной эксплуатации. Кроме этого, у многих автопроизводителей существует система гарантийных обязательств, при которой на элементы разных функциональных систем действуют

разные временные ограничения, их сложно оценить в рамках принятых форм расчета. Также, целый ряд предприятий реализуют сложную структуру гарантийного парка, когда для части клиентов устанавливаются повышенные гарантийные обязательства со стороны автопроизводителя, что также не просто учесть в расчетах;

2 предлагаемые показатели хорошо корреспондируются с количественными критериями качества, используемыми мировыми лидерами автопрома и маркетинговых услуг, что создает дополнительные предпосылки для повышения эффективности процессов бенчмаркинга;

3 природа новых показателей более понятна и объяснима. В экспертных и потребительских группах ее рассматривают одинаково, как приведенный уровень зарегистрированных в сервисе отказов на ЭМБ и АКЭУ с заданной датой выпуска (продажи) и периодом эксплуатации.

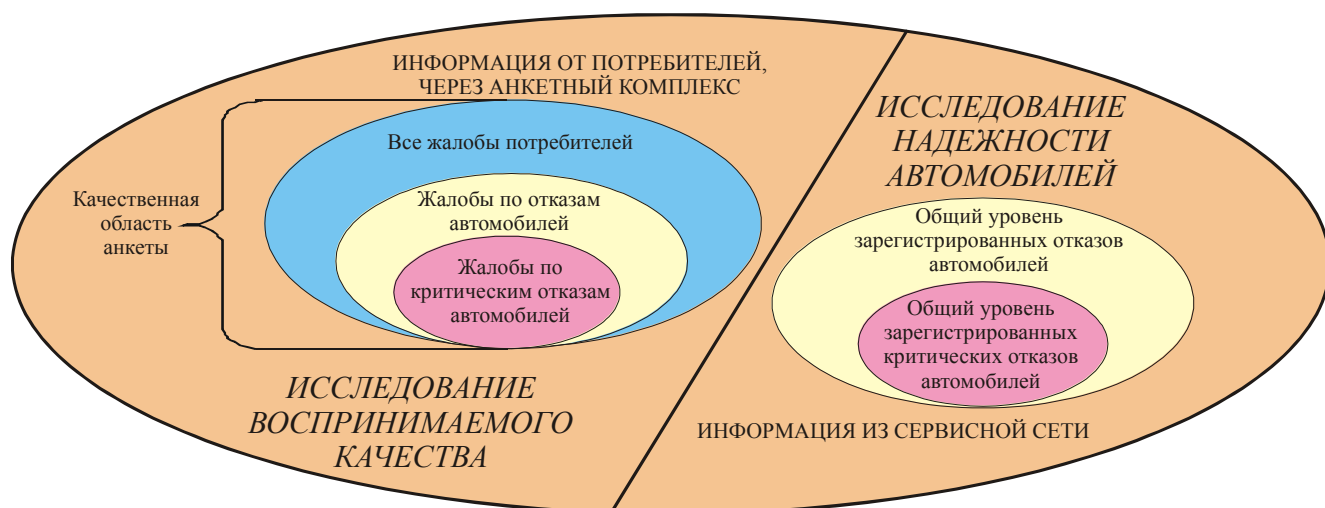


Рисунок 5.21 – Модель системы совместных исследований надежности и воспринимаемого качества ЭМБ и АКЭУ в эксплуатации

Еще одним аспектом, на который следует обратить внимание, прежде чем перейти ко второму направлению работы, является вопрос структурирования новых показателей качества. Для обеспечения гармоничной связи в системе исследований необходимо учесть, что кроме отказов, устраняемых в обычном порядке, существуют отказы, приводящие к обездвиживанию АТС. Именно эти отказы рассматриваются потребителями наиболее критично. Современная практика исследований показывает, что наличие даже одного такого отказа в первый год экс-

плуатации ЭМБ и АКЭУ обнуляет показатель лояльности потребителя к марке. Также, цена владения ЭМБ и АКЭУ является важным критерием оценки качества, как для производителя, так и потребителя продукции. Для автопроизводителя – это инструмент планирования бюджета для реализации гарантийных обязательств. Для потребителя – собственный бюджет на поддержание эксплуатационной эффективности транспортного средства. Несомненно, что в структуре показателей качества ЭМБ и АКЭУ в эксплуатации должны присутствовать как минимум три критерия определяющих общий, критический уровень, а также стоимостный эквивалент общего уровня отказов.

При реализации второго направления работы, сначала остановимся на новом показателе оценки удовлетворенности, обеспечивающим процесс исследования сходимости данных поступающих по линиям исследования надежности и воспринимаемого качества. На наш взгляд, природа данного показателя должна соответствовать критерию общего уровня отказов рассмотренного чуть выше. Естественным отличием предлагаемой оценки удовлетворенности от показателя уровня отказов, является то, что в рамках анкетного комплекса его можно представить как интегральный, охватывающий всю проблемную информацию, поступающую в качественном (текстовом) виде от потребителей (рисунок 5.21). Этим достигается возможность расширения горизонта представления данных об удовлетворенности потребителей воспринимаемым качеством продукции. Таким образом, в интегральной оценке можно выделить проблемные сегменты по общему уровню жалоб, по общему уровню отказов, а также по уровню критических отказов, для этого необходимо спроектировать вопросную базу анкеты.

Принципы формирования предметной области, а также организация процесса исследования на основе анкетных комплексов – измерителей воспринимаемого качества продукта проиллюстрированы на рисунке 5.22.

При реализации исследований воспринимаемого качества нового продукта, необходимо отметить ограничения по составу респондентов. В исследовании не могут участвовать так называемые экспертные группы потребителей – водители такси, работники предприятий автомобильной промышленности и специалисты

сервиса. Более того, если членом семьи потенциального респондента является представитель экспертного сообщества, то его участие в исследовании также прекращается.

Исследования реализуются по разработанной базе данных потребителей. Практика показывает, что формирование базы – это один из наиболее сложных вопросов. Существует так называемый критерий результативности процесса анкетирования. Критерий может быть равен единице, только в том случае, если при интервьюировании, от потребителя получены все ответы по вопросной базе. В Западной Европе из 1000 потенциальных респондентов, только 15 – 20% соглашаются на опрос. В России эта доля еще ниже и составляет примерно от 10 – 15%. При этом необходимо учитывать критерий распределения потребителей по географическим регионам, в зависимости от объемов продаж продукции [134].

Анкеты, состоящие примерно из трех десятков вопросов с ключами, обеспечивающими переходы внутри вопросной базы в зависимости от ответов потребителей, структурируются таким образом, чтобы в процессе опроса реализовать переход от общего к частному, т.е. от общей, бальной оценки удовлетворенности потребителей ЭМБ и АКЭУ в целом, к удовлетворенности качеством работы определенной системой. На каждом шаге потребителю дается возможность для предоставления объема информации в качественном выражении, причем дословно. Именно эта область после интерпретации результатов используется для расчета интегральной оценки удовлетворенности. В анкете предусматривается блок вопросов вызывающих у потребителей эмоциональную окраску в ответах – это так называемый блок «нравится - не нравится».

В результате анкетирования формируется так называемая «сырая», т.е. необработанная база данных по удовлетворенности потребителей воспринимаемым качеством продукта. Она формируется в виде электронной таблицы с целью обеспечения эффективности процесса обработки. Далее проводится оперативный анализ – для формирования короткого, и углубленный анализ данных – для формирования полного отчета.

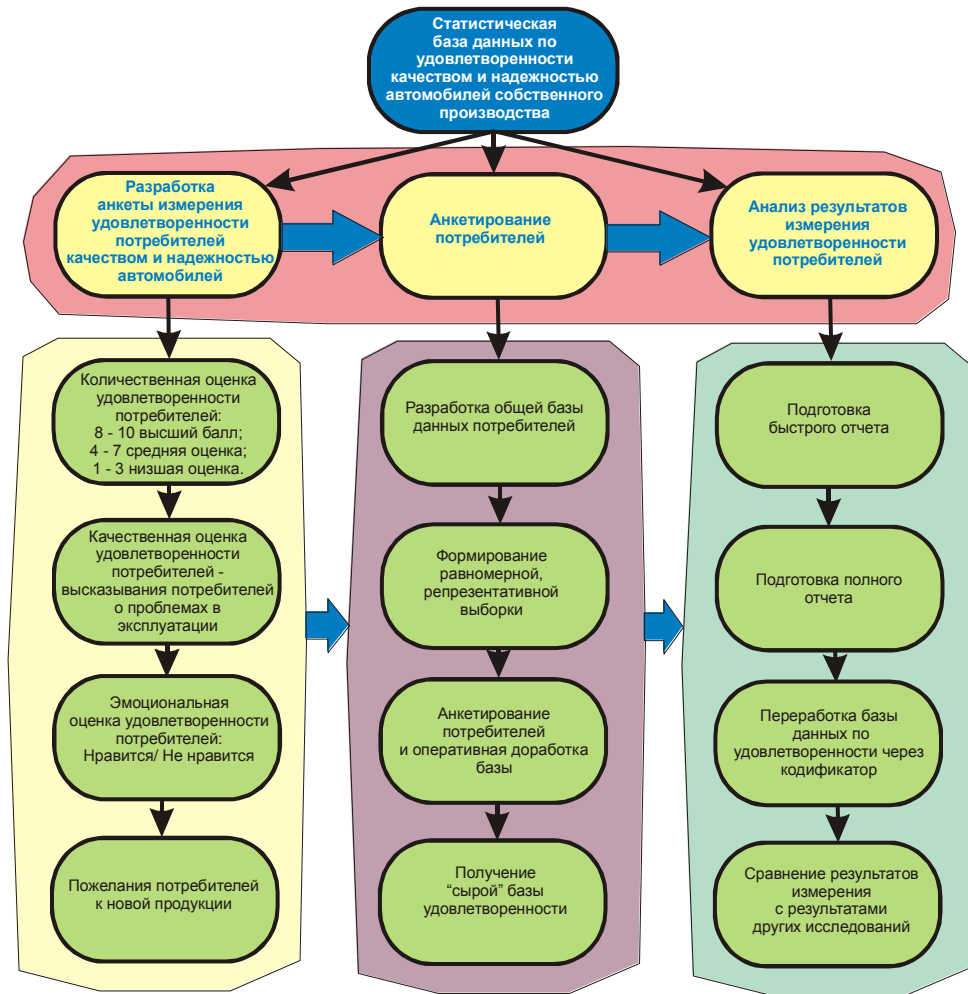


Рисунок 5.22 – Модель процесса исследования воспринимаемого качества ЭМБ и АКЭУ

Короткий отчет отражает общие тенденции в определении потребительской удовлетворенности, обеспечивает формирование основы полного отчета, содержащего детальное рассмотрение практически каждой из вскрытых в ходе исследования проблем.

В качестве примера приведем некоторые формы результатов исследования воспринимаемого качества ЭМБ и АКЭУ по результатам двенадцати месяцев эксплуатации по трем моделям. Первая и вторая модель – автомобили собственного производства, третья модель – продукт конкурента. Диаграмма, представленная на рисунке 5.23 посвящена анализу удовлетворенности потребителей по функциональным областям автомобиля с использованием бальной оценки. Сравнительный анализ удовлетворенности (рисунок 5.23) проводится относительно Модели 3 автомобиля конкурента. В качестве основных критериев оценки диаграмм-

мы используются уровень бальной оценки удовлетворенности по функциональным областям автомобилей и диапазон ее изменения от наименьшего до наибольшего значений [135].

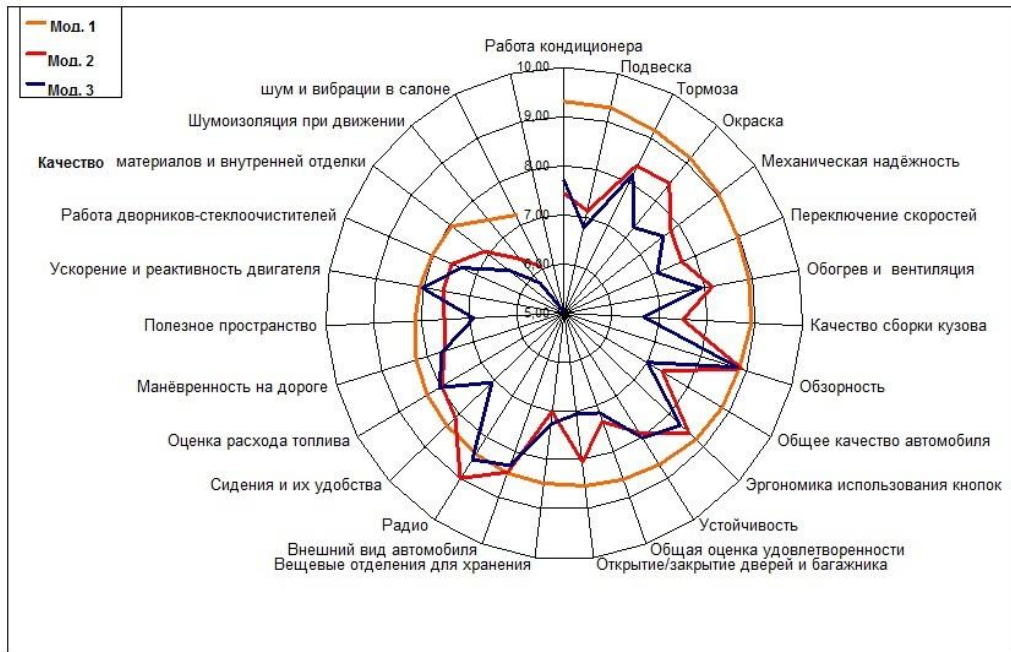


Рисунок 5.23 – Диаграмма сравнения бальных оценок удовлетворенности потребителей по функциональным областям автомобилей

Сравнение эмоциональных характеристик удовлетворенности потребителей качеством автомобилей представлено на рисунке 5.24. Здесь необходимо отметить, что эмоциональный окрас в ответах измеряется путем анализа областей анкеты с качественным представлением информации. Вообще такой анализ – это отдельная формализованная технология. В корпорациях лидерах отрасли работают аналитические группы специалистов, которые проводят анализ и интерпретацию голоса потребителя. При этом существуют инструменты позволяющие кодифицировать качественную область анкет по системам автомобиля, что обеспечивает эффективный перевод мнения потребителей на язык инжиниринга.

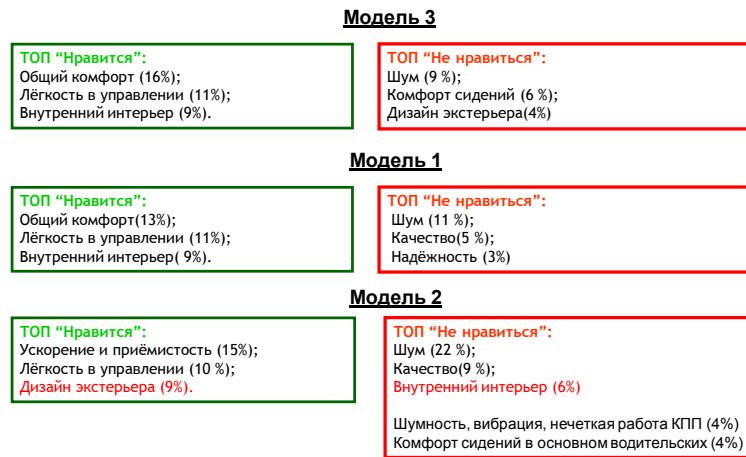


Рисунок 5.24 – Эмоциональная оценка воспринимаемого качества автомобилей

На рисунке 5.25 представлена диаграмма распределения интегральной оценки удовлетворенности (E%), отражающей приведенный уровень жалоб потребителей по функциональным областям автомобилей.

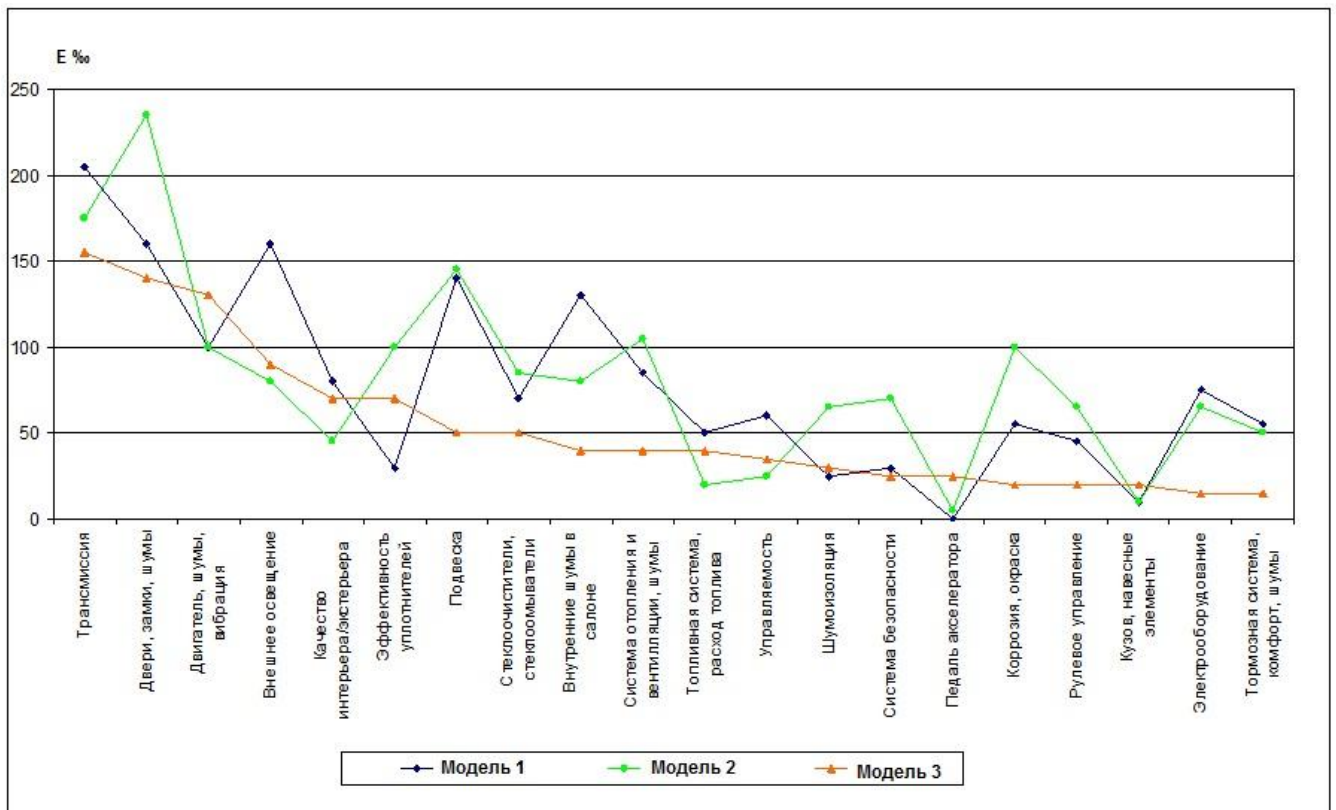


Рисунок 5.25 – Распределение интегральной оценки удовлетворенности потребителей воспринимаемым качеством автомобилей

Теперь, возвращаясь к системе совместных исследований качества рисунок 5.21, мы можем отметить наличие общих областей в результатах работы по обозначенным ключевым направлениям (надёжности и воспринимаемому качеству

автомобилей), заключающихся в секторах отказов. Несомненным преимуществом получаемых при этом результатов, является возможность исследования информации из разных источников на предмет сходимости данных, что в свою очередь обеспечивает формирование выводов о качестве продукции с высоким уровнем доверительности, с учетом весомости влияния широкого спектра проблем на удовлетворенность потребителей.

По рассмотренным выше принципам измерения качества, сегодня работают крупнейшие автомобильные корпорации мира. Они реализуют комплексы анкетных исследований для собственной продукции и продукции конкурентов, через инструменты бенчмаркинга, привлекая авторитетные экспертные маркетинговые институты.

Большим авторитетом в Европе пользуется рейтинг компании Technischer Uberwachungs-verien – TUV (Немецкое Объединение технадзора) Итоги техосмотра автомобилей с крупнейших рынков Европы, являются базой для измерения качества и надежности как новых, так и подержанных АТС. Кроме этого, значительным влиянием на потребительскую и экспертную среду обладает компания J. D. Power, проводящая исследования по всему миру, путем опроса владельцев автомобилей по ключевым направлениям качества и надежности АТС.

Сегодня появляются новые формы сотрудничества между автопроизводителями – клубы, создаваемые для формирования мультибрендовых анкетных комплексов, с учетом специфических пожеланий участников. В рамках клуба проводится вся совокупность работ, начиная от формирования анкет, заканчивая предоставлением результатов, которые каждый из автопроизводителей интерпретирует исходя из внутренних корпоративных стандартов.

Таким образом, аналитические методы измерения качества автомобилей ориентированные на потребительскую оценку, в совокупности с традиционными данными из сервисной сети обеспечивают более полное представление выводов о текущем уровне конкурентоспособности продукции, а также обеспечивают возможность для разработки и реализации процесса стратегического планирования качества продукции.

5.4 Проблема стратегического планирования улучшения качества и надежности комплекса электрооборудования ЭМБ и АКЭУ

На рисунке 5.26 представлена обобщенная структура модели оценки бренда автопроизводителя, разработанная одним из лидеров рынка маркетинговых услуг в области организации и проведения исследований удовлетворенности потребителей качеством и надежностью продукции, компанией JD Power [158, 135].



Рисунок 5.26 – Структура модели оценки бренда

Модель (рисунок 5.26) отражает взаимосвязь между различными аспектами комплексной оценки бренда. В состав комплексной оценки входят оценки по единичным факторам: дизайн и набор характеристик автомобилей; цена автомобиля и ее важность для потребителя; эффективность системы распределения и работы с потребителем; качество продукта. Все перечисленные факторы, накапливаются и анализируются в сознании потребителей на протяжении десятилетий – они определяют имидж компании. Взвешенная сумма количественных оценок факторов, исходя из их значимости для потребителя, определяет общую количественную оценку бренда автопроизводителя.

Анализ рисунка 5.26 показывает, что сложившееся у многих специалистов в области качества понимание значимости качества как соответствие продукции требованиям потребителя уже требует расширения сознания. Качество – это дизайн и набор характеристик, потому, что потребитель не будет удовлетворен продуктом с невысоким уровнем дизайна и соответствующим набором характеристик. Качество – это эффективность организации процесса проектирования, закупок, производства, продаж и послепродажного обслуживания, потому, что здесь определяется эффективность системы в целом и цена за продукт в частности. Качество – это оценка распределительной системы и системы работы с потребителем. Конечно, качество продукта является одной из определяющей величин общей оценки. Качество работы по всем выделенным направлениям, в долгосрочной перспективе определяет имидж, а, в конечном счете – высокую оценку бренда.

Эффективность решения проблемы повышения конкурентоспособности продукции отечественного автопрома заключается в разработке и внедрении системного комплексного метода стратегического планирования в области качества и надежности, который наиболее целесообразно развивать, с учетом особой важности, через разработку соответствующего метода для системы электрооборудования.

На рисунке 5.27 представлена, разработанная пирамида управления процессами анализа качества и надежности комплекса электрооборудования ЭМБ и АКЭУ и определения направления развития системы [134].

Базовые цели по статистике отказов электрооборудования (рисунок 5.27) формируют известную российским специалистам в области качества систему постановки и достижения целей предприятия в области качества. Из анализа статистики отказов электрооборудования ЭМБ и АКЭУ собственного производства за предыдущий период, например за предыдущий год, проводится выбор цели в области качества на будущий период. Цель должна обладать свойствами: напряженности, достижимости и измеримости. В предлагаемой пирамиде есть существенное отличие от традиционного подхода. Отличие предлагаемой системы состоит в том, что в нашем случае цели устанавливаются на основе результатов бенчмар-

кинговых исследований в области качества и удовлетворенности потребителей ЭМБ и АКЭУ различных марок. Такая система назначения целей более эффективная, поскольку она базируется на объективной информации отражающей развитие качества и надежности системы электрооборудования не по одному производителю, а по рынку в целом.

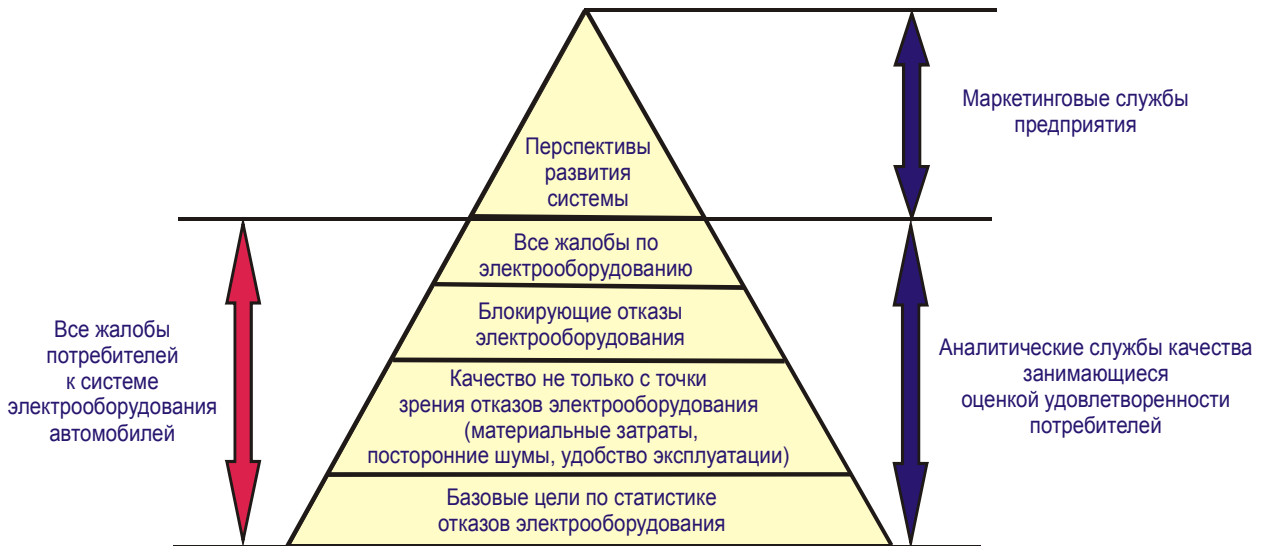


Рисунок 5.27 – Пирамида управления процессами анализа качества и надежности комплекса электрооборудования ЭМБ, АКЭУ и определения перспектив развития системы

Качество не только с точки зрения отказов электрооборудования (материальные затраты, посторонние шумы, удобство эксплуатации). Специалисты аналитических служб качества предприятий автомобильной промышленности привыкли, что основными источниками информации (рисунок 5.28) о качестве продукции являются базы данных об отказах по результатам гарантийной эксплуатации ЭМБ и АКЭУ поступающие от предприятий сервисно-сбытовой сети (ПССС).

Однако, в настоящее время, традиционная система сбора информации о качестве продукции в период эксплуатации нуждается в пересмотре. Для проведения полноценного анализа информации о качестве и удовлетворенности потребителей мы предлагаем модель, структура которой представлена на рисунке 5.29.

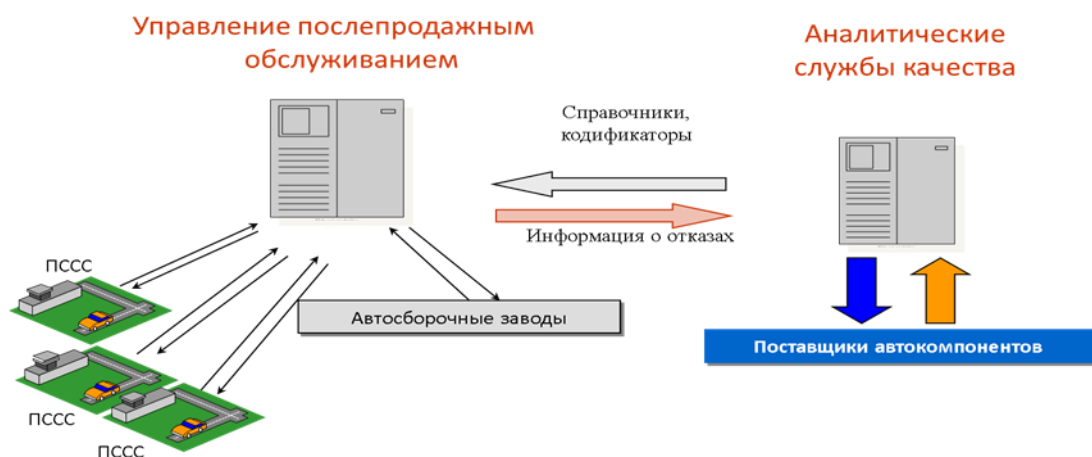


Рисунок 5.28 – Традиционная система сбора информации о качестве комплекса электрооборудования ЭМБ и АКЭУ в период гарантийной эксплуатации

Предлагаемая модель включает в себя не только основной источник данных – базы данных об отказах электрооборудования. В структуру модели включена информация специализированных автомобильных изданий (СМИ), в которых публикуются статьи представителей экспертного сообщества об уровне значимости электрооборудования в общей надежности ЭМБ и АКЭУ, об основных проблемах отрасли и т.д.

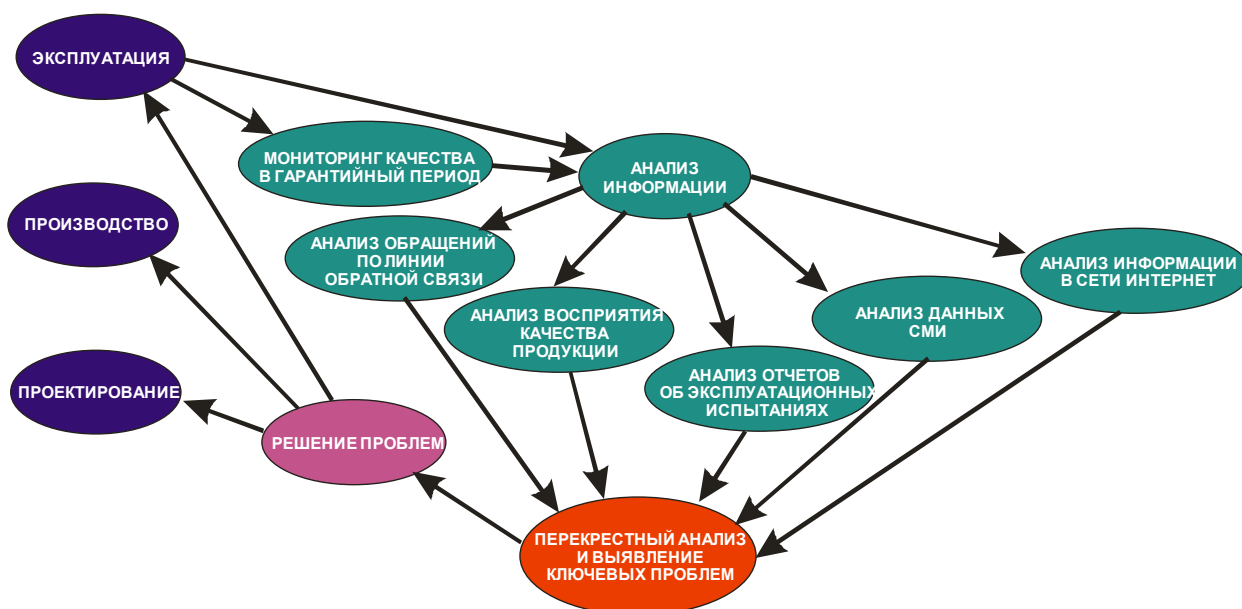


Рисунок 5.29 – Перспективная структура модели анализа удовлетворенности потребителей качеством и надежностью комплекса электрооборудования ЭМБ, АКЭУ и процесса разработки, реализации мер направленных на их улучшение

Анализ информации в сети Интернет, сегодня уже может рассматриваться как полноценный инструмент аналитика в области качества. Публикации и отзы-

вы потребителей на различных форумах во многом формируют представление об уровне качества и удовлетворенности.

Анализ восприятия качества продукции проводится с помощью специальных маркетинговых исследований удовлетворенности потребителей качеством и надежностью продукции, по которым часто отслеживается не высокий рейтинг надежности системы электрооборудования и значительное количество жалоб относящихся к дизайну инструментов управления электрооборудованием и их функциональностью.

Обратная связь с потребителем до сих пор многими воспринимается только как инструмент оперативного вмешательства со стороны автопроизводителя в случае возникновения проблем у потребителя с продукцией во время покупки или эксплуатации. На самом деле анализ обращений потребителей по линиям обратной связи демонстрирует возможность использования информации для определения проблем продукции с точки зрения качества и надежности.

Анализ отчетов об эксплуатационных испытаниях раньше рассматривался как инструмент определения сильных и слабых сторон электрооборудования при проектировании ЭМБ и АКЭУ. Сегодня проводятся серии эксплуатационных испытаний моделирующих потребительскую удовлетворенность. Достоинством такой работы является то, что квалифицированные специалисты-испытатели анализируют продукцию глазами потребителей.

Перекрестный анализ и выявление ключевых проблем является завершающей фазой анализа удовлетворенности потребителей качеством и надежностью электрооборудования. Здесь, на основе сопоставления отчетов о качестве и надежности продукции полученных из различных источников проводится выбор наиболее значимых проблем качества электрооборудования, включая отказы и жалобы по дизайну и функциональности [135, 158].

Возвращаясь к пирамиде управления процессами анализа качества и надежности комплекса электрооборудования ЭМБ, АКЭУ и определения перспектив развития системы (рисунок 5.27), переходим к ее следующему уровню – блокирующие отказы. Блокирующие отказы электрооборудования – это отказы эле-

ментной группы, возникновение которых приводит к невозможности эксплуатации транспортного средства по функциональным причинам или с точки зрения безопасности. Уровень пирамиды, который определяет работу с блокирующими отказами, гарантирует высочайший уровень ответственности автопроизводителя перед потребителем за разработку мероприятий направленных на снижение уровня блокирующих отказов системы электрооборудования. Именно при возникновении этих отказов в период эксплуатации ЭМБ и АКЭУ больше всего снижается оценка потребительской лояльности. То есть при возникновении блокирующего отказа в ЭМБ и АКЭУ, потребитель в качестве следующего вряд ли выберет продукцию того же производителя.

Следующий уровень пирамиды (рисунок 5.27) – это все жалобы по электрооборудованию. Данный уровень объединяет оценки по отказам системы электрооборудования в гарантийный период эксплуатации, включая блокирующие отказы, оценки уровня жалоб потребителей к характеристикам комфорта, функциональности и удобства управления элементами системы электрооборудования.

Самый верхний уровень пирамиды, являющийся периметром работы маркетинговой службы предприятия – это перспективы развития комплекса электрооборудования ЭМБ и АКЭУ. Пирамида устроена таким образом, что, несмотря на переход функциональной области анализа в области качества и надежности к маркетинговым исследованиям, мы понимаем, что вершина базируется на всех рассмотренных выше уровнях. То есть она является неотъемлемым звеном системы. Вершина черпает информацию необходимую для определения горизонта перспектив из соответствующих уровней пирамиды. Это свидетельствует о повышении уровня значимости функций управления качеством и надежностью на предприятии. Именно специалисты в области качества являются гарантами реализации в продукции базовых требований потребителей и во многом формируют перспективы ее развития.

Таким образом, проблема планирования улучшения качества и надежности комплекса электрооборудования ЭМБ и АКЭУ является актуальной. Решение проблемы заключается в разработке и реализации комплексных интегрированных

инструментов анализа удовлетворенности потребителей качеством и надежностью комплекса электрооборудования ЭМБ и АКЭУ.

5.5 Концепция повышения эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ на этапах жизненного цикла

Результаты деятельности главных мировых автомобильных салонов в 2011 году и в начале 2012 года показывают, что сегодня развитие автомобильной промышленности неразрывно связано с развитием так называемых «зеленых технологий». Уже сейчас нет ни одного крупного автопроизводителя, который не разрабатывал бы направление электромобилей или гибридных автомобилей. По мнению экспертов до 2020 г. около 20% новых автомобилей будет выпускаться с применением систем обеспечивающих эффективную экологичность и экономичность. И если, на первый взгляд, для России данная проблема пока не является актуальной, то для стран Западной Европы, США, Японии, Китая проблема снижения вредных выбросов городского автомобильного транспорта превращается в глобальную. Другой стороной обеспечивающей развитие «зеленых технологий» является снижение мировых запасов нефти и газа.

Итак, разработка и производство новых конструкций ЭМБ и АКЭУ становится наиболее реальным сценарием развития мирового автомобилестроения. По сути, данные направления пока частично, а в перспективе возможно и в полном объеме заменят традиционные направления развития автомобильной техники. В наиболее развитых странах, с учетом сделанного вывода, параллельно с развитием технологий проектирования и производства, решается проблема обеспечения качества и надежности новых автомобилей. В России данное направление развивается не в полной мере.

В работе, мы рассматривали проблему стратегического планирования улучшения качества и надежности системы электрооборудования автомобилей. Теперь, на основе разработанной пирамиды управления процессами, выстраивается концепция обеспечения качества и надежности ЭМБ и АКЭУ на этапах жиз-

ненного цикла [135, 150]. Мы считаем, что совершенствование системы обеспечения качества и надежности электрооборудования наиболее логично реализовывать на базе инновационных продуктов.

Дополнительным, не менее важным аргументом развития инструментов обеспечения качества и надежности на базе автомобилей с «зелеными технологиями», где система электрооборудования становится ключевой, является то, что эта же система является наиболее уязвимой с точки зрения показателей безотказности.

На основании вышеизложенного, представляем модель концепции повышения эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ (рисунок 5.30). Модель отражает взаимодействие процессов маркетинга, проектирования, производства и эксплуатации на основе реализации комплекса оценки качества и надежности автомобилей. Концепция является проводником стратегического планирования в области качества продукции.

Рассмотрим компонентную область модели. Базовые цели в области качества трансформируемые из статистических данных по отказам автомобилей в период гарантийной эксплуатации формируют известную российским специалистам в области качества систему постановки и достижения целей предприятия в области качества. Из анализа статистики отказов автомобилей за предыдущий период, например за предыдущий год, проводится выбор цели в области качества на будущий период. Цель должна обладать свойствами: напряженности, достижимости и измеримости. В предлагаемой нами пирамиде есть существенные отличия от традиционного подхода [135].

Отличия предлагаемой системы состоят в том, что в нашем случае цели устанавливаются на основе результатов бенчмаркинг-исследований в области качества и удовлетворенности потребителей автомобилей различных марок. Такая система назначения целей более эффективная, поскольку она базируется на более полной и объективной информации отражающей развитие качества и надежности автомобилей не по одному производителю, а по рынку в целом.

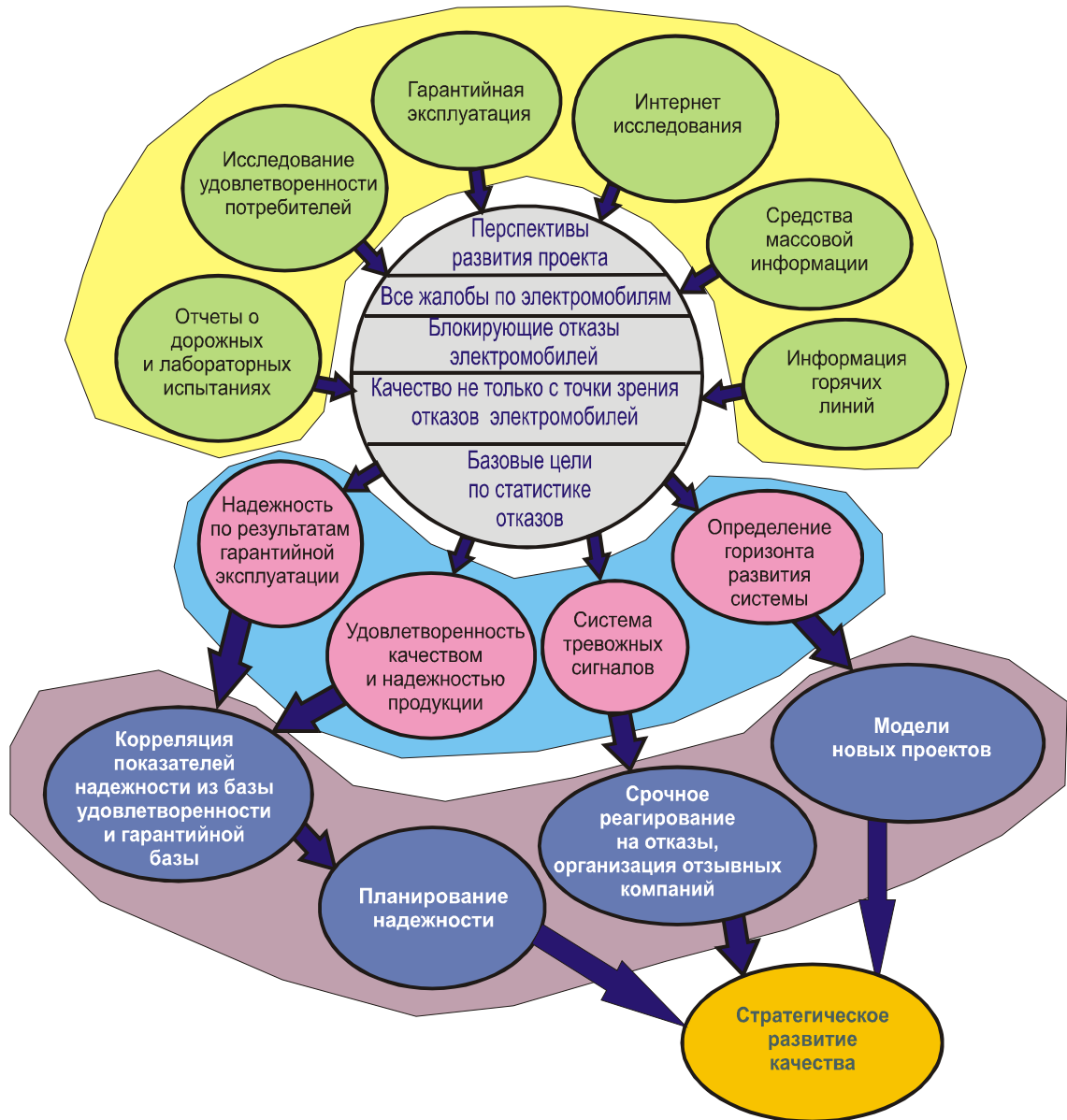


Рисунок 5.30 – Структурная модель концепции повышения эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ на этапах жизненного цикла

Качество не только с точки зрения отказов ЭМБ и АКЭУ (материальные затраты, посторонние шумы, удобство эксплуатации). Специалисты аналитических служб качества предприятий автомобильной промышленности привыкли, что основными источниками информации о качестве продукции являются базы данных об отказах по результатам гарантийной эксплуатации автомобилей поступающие от предприятий сервисно-сбытовой сети (ПССС).

Однако, в настоящее время, традиционная система сбора информации о качестве продукции в период эксплуатации нуждается в пересмотре. Предлагаемая модель включает в себя не только основной источник данных – базы данных об

отказах автомобилей. В частности, в структуру модели включена информация специализированных автомобильных изданий (СМИ), в которых публикуются статьи представителей экспертного сообщества об уровне значимости электрооборудования в общей надежности автомобилей, об основных проблемах отрасли и т.д.

В таблице 5.3, в качестве примера, представлен анализ удовлетворенности потребителей одной из самых популярных российских марок автомобилей в 2008 – 2011гг. по результатам работы с публикациями специализированных изданий СМИ с выбором наиболее значимых проблем в области качества продукции.

Таблица 5.3 – Анализ удовлетворенности потребителей автомобилей по данным СМИ

№ п/п	2008г.		2009г.		2010г.	
	Наименование позиции	Оценка	Наименование позиции	Оценка	Наименование позиции	Оценка
1.	Плохая шумоизоляция	22	Плохая шумоизоляция	22	Тугое, нечеткое переключение передач КПП	30
2.	Не высокая информативность рулевого управления	15,4	Вибрация кузова, на руле, рычаге КПП	22	Не высокая информативность рулевого управления	30
3.	Вибрация кузова, на руле, рычаге КПП	12	Не высокая информативность рулевого управления	11	Не высокое качество материалов интерьера	30
4.	Тугое, нечеткое переключение передач КПП	8,8	Не эффективные тормоза	11		
5.	Слабый ДВС	8,8	Не высокое качество материалов отделки салона	5,5		
6.	Не устойчивость на поворотах	6,6	Скрип обивки салона	5,5		
7.	Боковые стекла не опускаются до конца	4,4	Не устойчивость на поворотах	5,5		
8.	Малый объем бардачка	4,4	Не удачное расположение контроллера под радиатором отопителя	5,5		
9.	Отсутствие подголовников на заднем сиденье	4,4	Неприятный запах в салоне	5,5		
10.	Неприятный запах в салоне	2,2	Не высокое качество сборки	5,5		
11.	Водительскому креслу не хватает боковой поддержки	2,2				
12.	Слишком податливый (мягкий) материал кресел	2,2				
13.	Не выразительный интерьер, экстерьер	2,2				
14.	Не высокое качество материалов отделки салона	2,2				
15.	Длинный руль	2,2				

Для выбора важных проблем удовлетворенности, введена количественная оценка значимости, представляющая собой процентную долю упоминаний проблемных вопросов в автомобильных изданиях. Кроме того для определения топовой группы проблем проведен совместный анализ полученных данных по годам. В результате которого, появилась возможность для введения классификации: проблемы, фигурирующие в списке важных каждый год; проблемы, представленные в списке важных – в течение двух лет; проблемы, появившиеся в списке важных по результатам анализа за один год.

Анализ информации в сети Интернет, сегодня уже может рассматриваться как полноценный инструмент аналитика в области качества. Публикации и отзывы потребителей на различных форумах во многом формируют представление об уровне качества и удовлетворенности.

В качестве примера, на рисунке 5.31 представлен алгоритм работы автоматизированного лингвистического анализатора удовлетворенности потребителей предназначенного именно для исследования информации в сети Интернет, разработанного одним из лидеров рынка – компанией ЕРАМ [150].



Рисунок 5.31 – Лингвистический анализатор компании ЕРАМ.

На рисунке 5.32 представлен интерактивный подход к решению аналитической задачи с помощью автоматизированной системы ЕРАМ.

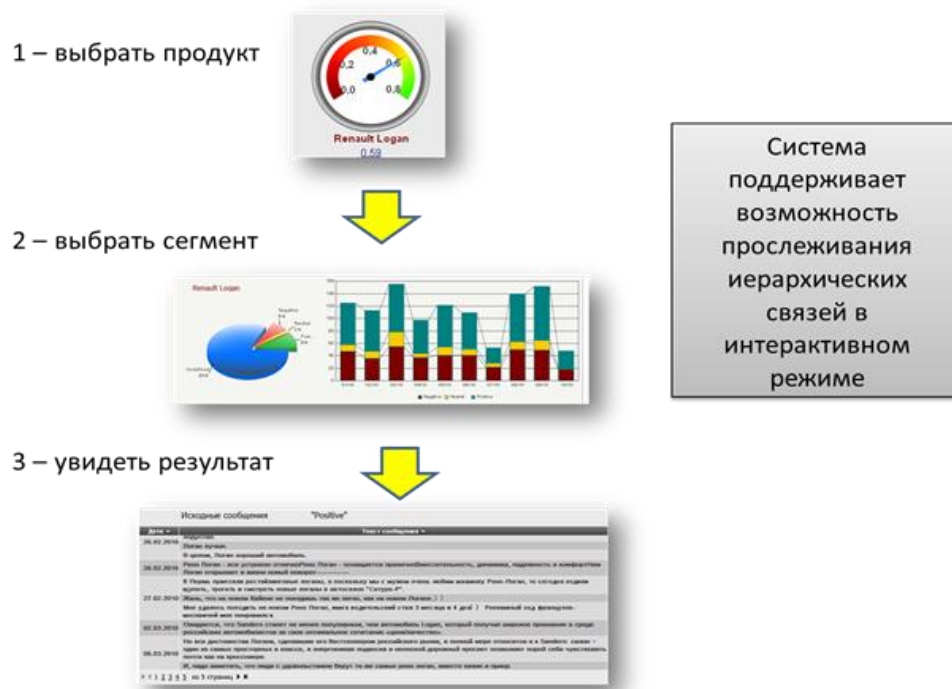


Рисунок 5.32 – Интерактивный подход ЕРАМ в решении аналитической задачи

Анализ восприятия качества продукции проводится с помощью специальных маркетинговых исследований удовлетворенности потребителей качеством и надежностью продукции, по которым отслеживается рейтинг надежности автомобилей, а также жалоб относящиеся к дизайну, комфортабельности и функциональности автомобилей/

Обратная связь с потребителем до сих пор многими воспринимается только как инструмент оперативного вмешательства со стороны автопроизводителя в случае возникновения проблем у потребителя с продукцией во время покупки или эксплуатации. На самом деле анализ обращений потребителей по линиям обратной связи демонстрирует возможность использования информации для определения проблем продукции с точки зрения качества и надежности [158]..

На рисунке 5.33, как раз представлено взаимодействие процессов проектирования, производства и послепродажного обслуживания в решении наиболее важных проблем волнующих потребителей. После решения проблем, усовершенствованный продукт или услуга поступает к потребителю. После чего появляется

возможность для измерения эффективности проведенных мероприятий по улучшению.

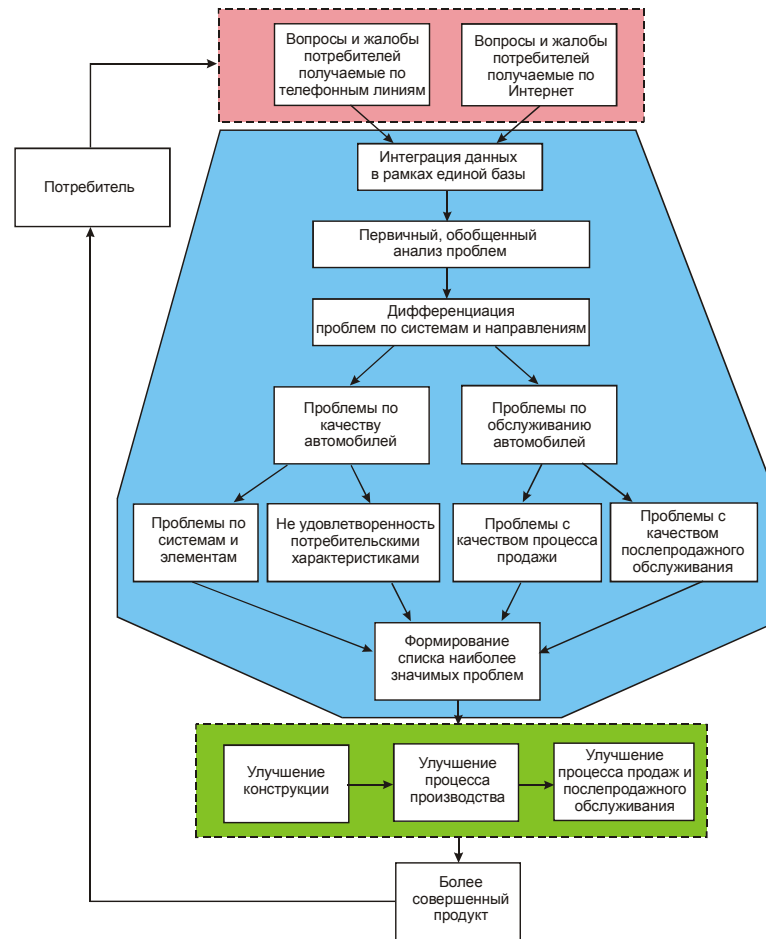


Рисунок 5.33 – Структура работы системы обратной связи с потребителем

В качестве примера, на рисунке 5.34 представлены результаты анализа проблемных технических вопросов поступивших в феврале 2011 г. для одной из моделей автомобилей отечественного производства по линии обратной связи с потребителем. Первичный анализ выявленных проблем показывает распределение проблемных вопросов по основным системам автомобилей. В данном случае, проблемными являются: двигатель внутреннего сгорания (ДВС), электрооборудование, коробка переключения передач (КПП) и подвеска.

Измерение динамики изменения проблемных вопросов из месяца в месяц дает возможность для отслеживания удовлетворенности потребителей.

Анализ отчетов об эксплуатационных испытаниях раньше рассматривался как инструмент определения сильных и слабых сторон автомобилей. Сегодня

проводятся серии эксплуатационных испытаний моделирующих потребительскую удовлетворенность. Достоинством такой работы является то, что квалифицированные специалисты-испытатели анализируют продукцию глазами потребителей.

Сегментация проблемных вопросов по качеству автомобилей

Темы проблемных вопросов по группам

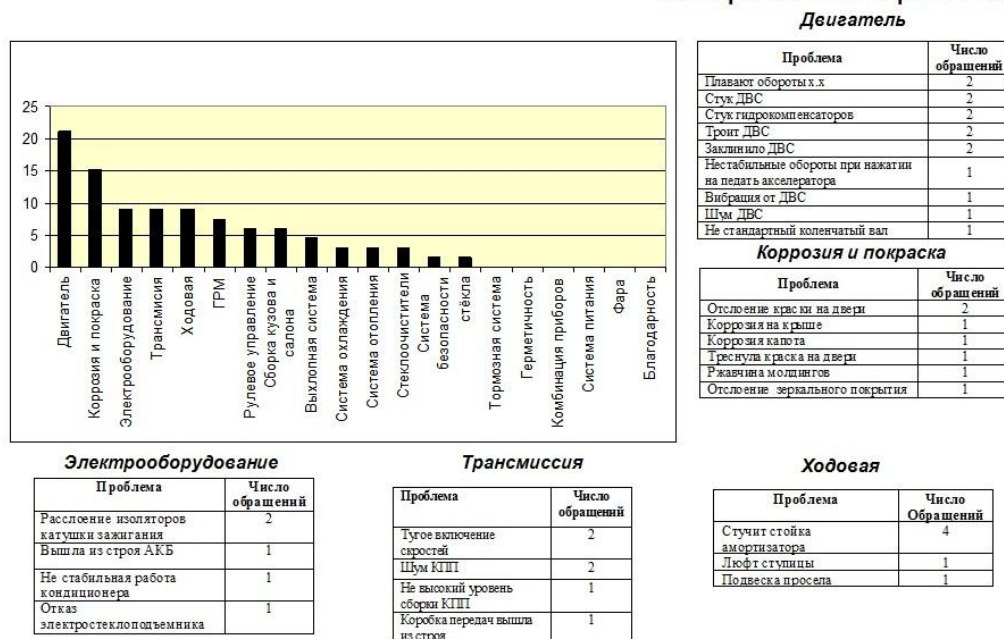


Рисунок 5.34 – Распределение проблемных вопросов к качеству автомобилей по основным системам

На рисунке 5.35 представлена модель удовлетворенности потребителей автомобилей в сравнении с аналогами, по результатам эксплуатационных испытаний.

Перекрестный анализ и выявление ключевых проблем является завершающей фазой анализа удовлетворенности потребителей качеством и надежностью автомобилей.

В таблице 5.4 представлен пример перекрестного анализа проблем качества автомобилей одной из популярных в РФ марок.

УДОБСТВО ПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМОБИЛЕМ
ПРОЕКТА

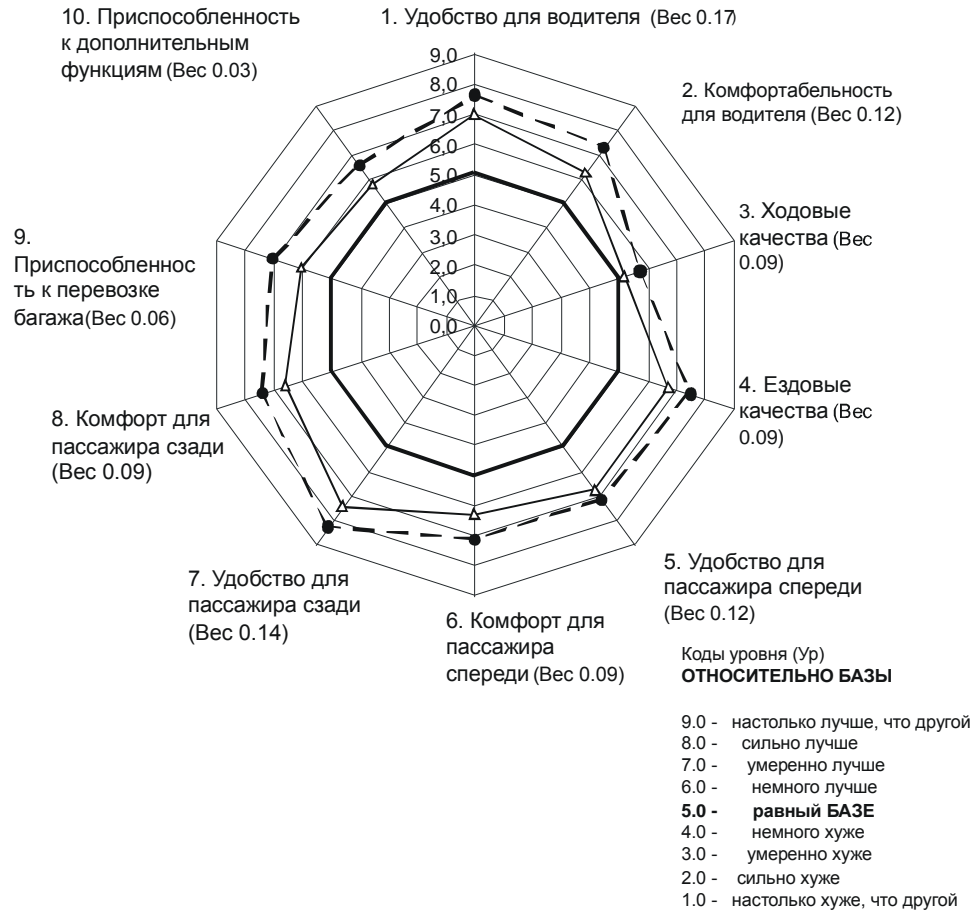


Рисунок 5.35 – Модель удовлетворенности потребителей автомобилей по результатам эксплуатационных испытаний

Перекрестный анализ проводится методом сопоставления результатов различных исследований в области удовлетворенности потребителей. Как видно из таблицы 5.4 «+» обозначены проблемы выделенные в каждом конкретном исследовании, «-» обозначено отсутствие проблемы в рассматриваемом исследовании.

В результате перекрестного анализа образуется группа наиболее важных проблем качества продукции, при этом очень важно, что полученный список проблем формируется на основе результатов измерения удовлетворенности потребителей, проводимого по самым разным методологиям.

Таблица 5.4 – Перекрестный анализ проблем удовлетворенности потребителей качеством автомобилей

№ п/п	Наименование фактора	Источники анализа удовлетворенности потребителей					Повторяемость
		Анализ восприятия	СМИ	«Обратная связь»	«Estel» (3 мес)	Моделирование потребительской удовлетворенности	
1	Шум ДВС, КПП	+	+	+	+	+	5
2	Внутренний шум в салоне	+	+	+	+	+	5
3	Надежность (частота проявления отказов)	+	-	+	+	-	3
4	Вибрации кузова, инструментов управления, сиденья	-	+	-	+	+	3
5	Нечеткое, тугое переключение КПП, низкая скорость переключения КПП	-	+	-	+	+	3
6	Тугое открывание/закрывание дверей	-	+	-	+	+	3
7	Неинформативное рулевое управление	-	+	-	+	+	3
8	Длинный руль	-	+	-	+	+	3
9	Неэффективное торможение	-	+	-	-	+	2
10	Невысокое качество сервисного обслуживания	+	+	-	-	-	2
11	Отсутствие запасных частей для ремонта а/м	+	+	-	-	-	2

Концепция обеспечения качества и надежности ЭМБ и АКЭУ, на этапе получения информации поступающей с этапов жизненного цикла обеспечивает формирование наиболее полной и достоверной картины, отражающей технические характеристики продукции. Далее информация проходит этап исследования и реализации в виде мероприятий направленных на улучшение показателей качества и надежности.

5.6 Метод стратегического планирования качества и надежности ЭМБ и АКЭУ

Модель, представленная на рисунке 5.30 актуализирует все связи рассматриваемых процессов. На сегодняшний день ее можно назвать как наиболее полную модель измерения качества и надежности ЭМБ и АКЭУ. Структура модели отражает инновационный метод стратегического планирования улучшения качества ЭМБ и АКЭУ [158].

Рассмотрим структуру модели. Блок корреляции показателей надежности из базы удовлетворенности и гарантийной базы в расширенном виде показан на рисунке 5.36. Данные поступающие к автопроизводителю по линии сервисного обслуживания (ИС ПССС) представляют собой статистику отказов ЭМБ и АКЭУ в период эксплуатации. Базы данных удовлетворенности потребителей – это статистические данные отражающие удовлетворенность потребителей ЭМБ и АКЭУ, полученные по результатам анкетирования, например с помощью анкеты Estel. Обе базы данных должны иметь высокий коэффициент связи (корреляции), поскольку в обоих случаях рассматриваются данные, часть из которых отражает отказы ЭМБ и АКЭУ в эксплуатации.

После корреляции данных, принимается условие достоверности базы данных по удовлетворенности. Далее на основе реализации корреляционной зависимости между данными по удовлетворенности потребителей продукции конкурентов рассчитывается уровень отказов по ЭМБ и АКЭУ конкурентов исходя из которого реализуется процесс проецирования данных по отказам собственной продукции и данных по отказам ЭМБ и АКЭУ конкурентов, т.е. проводится бенчмаркинг по техническим характеристикам продукции. Сравнительный анализ продукции конкурентов с точки зрения качества создает предпосылки для планирования перспективного уровня качества собственной продукции, т.е. стратегического планирования улучшения качества продукции (рисунок 5.36). В соответствии с матрицей ответственности СМК предприятия, для каждого процесса определяется собственная стратегическая цель в области качества, т.е. реализуется функция трансформации глобальных целей в цели каждого из процессов.

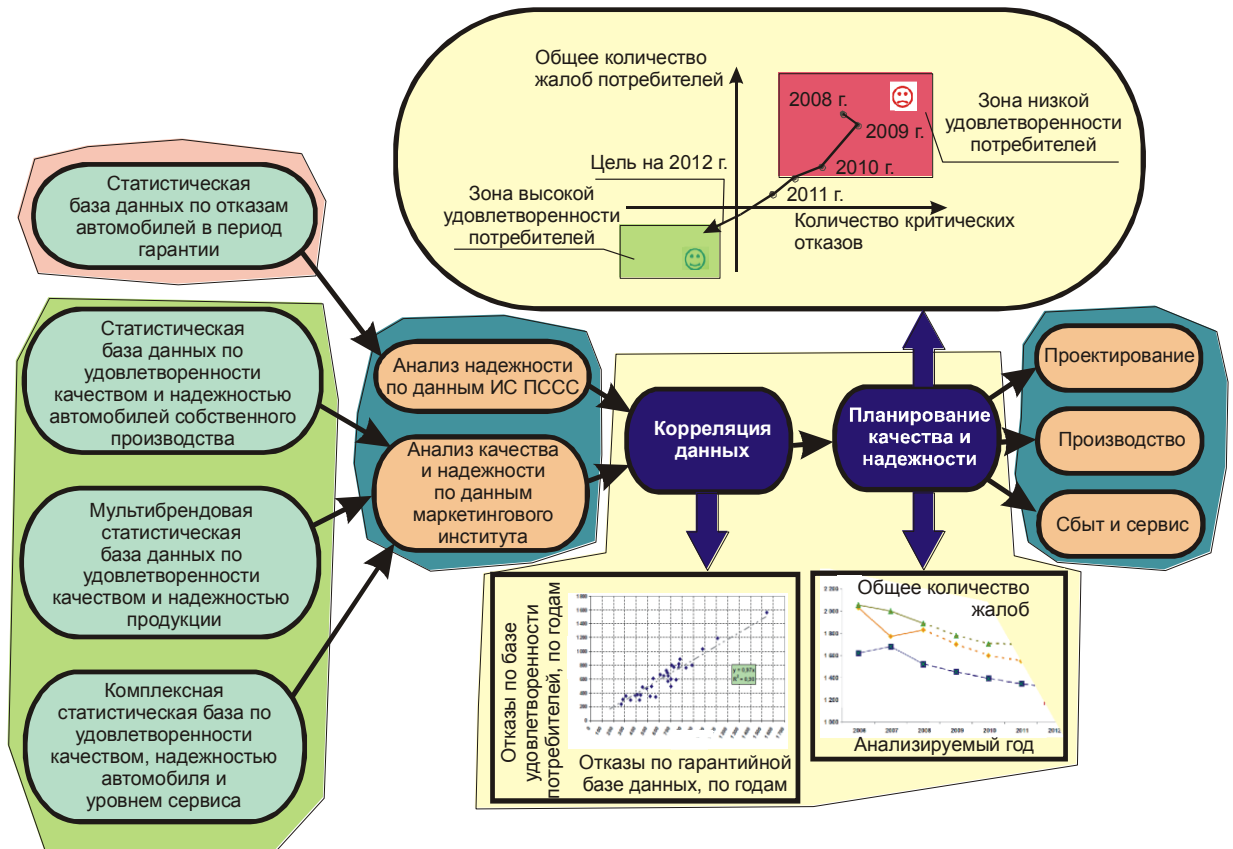


Рисунок 5.36 – Модель процесса стратегического планирования улучшения качества и надежности ЭМБ и АКЭУ

Реализация метода стратегического планирования в рамках концепции обеспечения качества и надежности электромобилей и автомобилей с гибридной силовой установкой обеспечивает решение следующих научно-технических задач:

- 1 разработку количественных критериев оценки качества и надежности продукции по результатам эксплуатации ЭМБ и АКЭУ, в том числе критерия отражающего уровень блокирующих отказов;
- 2 разработку количественных критериев оценки удовлетворенности потребителей качеством и надежностью продукции;
- 3 определение взаимосвязи между показателями качества, надежности и показателями удовлетворенности;
- 4 разработку системы кодификации проблем надежности;
- 5 проектирование и построение системы прогнозирования надежности на ранних этапах жизненного цикла продукции;

6 реализация стратегической системы планирования и мониторинга качества ЭМБ и АКЭУ.

5.7 Выводы по главе

Анализ методов измерения качества и надежности автомобилей показывает, что, к сожалению, на сегодняшний день не существует универсальных и наиболее полных инструментов для оценки положения продукции в рейтинге качества и надежности.

Существуют традиционные методы, основным отличием которых является наиболее полное использование статистических инструментов измерения уровня отказов в эксплуатации, на основе оценки которых определяется уровень качества и надежности автомобилей. При этом не учитывается информация, которая не обладает формализованностью в рамках кодификатора отказов.

Анализ практических подходов к процессам измерения, прогнозирования и планирования качества и надежности показывает, что уже сейчас недостаточно использовать статистические базы данных по отказам для того чтобы грамотно управлять качеством и надежностью автомобилей. Необходимо учитывать голос потребителя в самых разных формах оценки удовлетворенности и лояльности. Существуют информационные пласты качества и надежности, которые невозможно описать, по крайней мере, в первом приближении, формализованными кодами отказов. Здесь требуется сильный аналитический аппарат.

Для наиболее полной организации системы работы по измерению, прогнозированию и планированию качества и надежности перспективных автомобилей мы предлагаем использовать самые передовые аналитические разработки, которые в совокупности с традиционными методами обеспечивают формирование комплексного подхода обеспечения качества и надежности выпускаемой продукции. Именно такая идеология способствует адекватному ответу современным вызовам конкурентного рынка.

Бенчмаркинг обеспечивает возможности сравнения собственных автомоби-

лей и процессов, связанных с ним, с продуктами конкурентов. Ощутимым недостатком метода является его дороговизна. При реализации бенчмаркинга важно грамотно подойти к проблеме выбора конкурентов. Практика показывает, что даже продвинутые автопроизводители зачастую допускают ошибки при реализации, казалось бы, простой задачи – выбора конкурента. Тем не менее, следует признать эффективность данного метода. Известен опыт одного из мировых лидеров автомобильного производства, который реализовал функцию технического бенчмаркинга через покупку новых автомобилей конкурентов, с тем, чтобы реализовывать их в виде цифровых виртуальных моделей. Это помогает повысить эффективность процессов разработки и производства с учетом заимствования чужого опыта.

Исследование удовлетворенности потребителей качеством и надежностью автомобилей – новый пласт технической информации – технический маркетинг. Исследование удовлетворенности потребителей посредством анкетирования позволяет более полно оценить уровень качества и надежности автомобилей на различных этапах эксплуатации от 1 до 46 месяцев. Получаемая информация главным образом не может быть описана формализованным кодификатором отказов, она более глубокая и качественная должна пройти этап аналитического исследования, по результатам которого формируется свой уникальный кодификатор удовлетворенности.

Наиболее эффективным методом исследования качества и надежности, на наш взгляд, является метод перекрестного анализа, когда полученная из одного источника информация сопоставляется с информацией других источников. Данная работа обладает большой трудоемкостью, но только реализация такого подхода в рамках межфункционального экспертного анализа обеспечивает возможности глубокого исследования качества и надежности автомобилей.

ГЛАВА 6. КОМПЛЕКС ПРОГРАММНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭМБ И АКЭУ

6.1 Оценка эффективности мероприятий направленных на повышение надежности ЭМБ и АКЭУ

Мониторинг результативности и эффективности мероприятий по корректирующим воздействиям является неотъемлемой частью современных систем менеджмента качества, отвечающих требованиям стандартов ИСО 9001, ИСО/ТУ 16949 [158].

Для решения проблемы оценки эффективности мероприятий направленных на повышение надежности ЭМБ и АКЭУ представляем методику определения эффективности корректирующих действий. При изложении методики использованы следующие термины:

внешние отказы ЭМБ и АКЭУ – отказы, выявляемые и устраняемые при послепродажном обслуживании ЭМБ и АКЭУ в гарантийный период эксплуатации, а так же отказы, выявляемые при испытании деталей, узлов и ЭМБ и АКЭУ на соответствие омологированным образцам или требованиям, заложенным в технических условиях;

внутренние отказы готовых ЭМБ и АКЭУ – отказы, выявляемые при изготовлении и испытании ЭМБ и АКЭУ, а так же при проведении предпродажной подготовки;

ответственный исполнитель – специалист, отвечающий за реализацию этапа корректирующих и предупреждающих мероприятий;

корректирующее действие – действие, предпринятое для устранения причины обнаруженного отказа;

предупреждающее действие – действие, предпринятое для устранения причины потенциального отказа.

Общая схема оценки эффективности корректирующих действий [144].

Анализ статистических источников для формирования запросов на улучшение качества. Массив отказов для проведения корректирующих и предупреждающих действий (мероприятий) формируется из ежемесячных статистических данных единой информационной системы (период обработки устанавливается 6 месяцев).

Анализ приведенных источников информации об отказах показывает, что для оценки результативности и эффективности корректирующих и предупреждающих действий наиболее целесообразно использовать данные из гарантийной эксплуатации, данные из производства и входного контроля.

Мониторинг внедренных мероприятий осуществляется в течение 6 месяцев после внедрения. В связи с этим целесообразно использовать для расчета эффективности мероприятий временной период такой же продолжительности до внедрения мероприятий.

Основные обозначения:

T – дата (месяц) внедрения мероприятий;

$D(t, s)$ – количество отказов в ЭМБ и АКЭУ с датой выпуска t и с датой устранения s по отказу с кодом Код отказа;

$ZO(t, s)$ – общие затраты на устранение отказа с кодом Код отказа на ЭМБ и АКЭУ с датой выпуска t и с датой устранения s ;

$ZU(t, s)$ – затраты на услуги при устранении отказов с кодом отказа Код отказа на ЭМБ и АКЭУ с датой выпуска t и с датой устранения s ;

$ZZ(t, s)$ – затраты на запасные части при устранении отказов с кодом Код отказа на ЭМБ и АКЭУ с датой выпуска t и с датой устранения s ;

$nD1(t)$ – прогнозируемое количество отказов на ЭМБ и АКЭУ с датой выпуска t , до внедрения мероприятий по улучшению;

$nD2(t)$ – прогнозируемое количество отказов на ЭМБ и АКЭУ с датой выпуска t , после внедрения мероприятий;

$N1$ – количество ЭМБ и АКЭУ выпущенных за 6 месяцев до внедрения мероприятий по улучшению;

N2 – количество ЭМБ и АКЭУ выпущенных за 6 месяцев после внедрения мероприятий.

Алгоритм расчета

1 Фиксируется Код отказа.

1.1 Вычисление характеристик отказа по неполным данным.

1.2 Вычисляются величины $D(t, s < T+6)$, для $t = T-12, \dots, T+6$.

1.3 Вычисляются величины $ZO(t, s < T+6)$, для $t = T-12, \dots, T+6$.

1.4. Вычисляются месячные выпуски а/м на внутренний рынок по датам $t = T-12, \dots, T+6$.

Данные заносятся в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Данные гарантии по дате регистрации T+6

Дата	T-12	T-6	T-1	T	T+1	T+6
Отказы						
Общие затраты						
Выпуск ЭМБ и АКЭУ						

1.5 Вычисляются величины $D(t, s < T)$, для $t = T-12, \dots, T-1, T$.

1.6. Вычисляются величины $ZO(t, s < T)$, для $t = T-12, \dots, T-1, T$. Данные заносятся в таблицы 6.2.

Таблица 6.2 – Данные гарантии по дате регистрации T

Дата	T-12	T-6	T-1	T
Отказы				
Общие затраты				

1.7 Вычисляются величины $D(t, s < T-6)$, для $t = T-12, \dots, T-7$.

1.8 Вычисляются величины $ZO(t, s < T+6)$, для $t = T-6, \dots, T+6$, $ZU(t, s < T+6)$, для $t = T-6, \dots, T+6$, $ZZ(t, s < T+6)$, для $t = T-6, \dots, T+6$.

2 Вычисление коэффициентов для перехода к прогнозируемым количествам отказов:

2.1. Вычисляются величины коэффициентов

$$K1(t) = \frac{D(t,s < T+6)}{D(t,s < T)}, \quad (6.1)$$

для $t = T-12, \dots, T-7$.

2.2 Вычисляются величины коэффициентов

$$K2(t) = \frac{D(t,s < T+6)}{D(t,s < T)}, \quad (6.1)$$

для $t = T-6, \dots, T-1$.

Коэффициенты заносятся в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Коэффициенты для прогнозирования

Номер столбца	1	2	3	4	5	6
K1(t)						
K2(t)						

3 Прогнозирование количества отказов.

3.1 Вычисляются величины $nD1(t)$

$$nD1(t) = D(t, s < T + 6) \times K1(t), \quad (6.3)$$

для $t = T-6, \dots, T-1$.

3.2 Вычисляются величины $nD2(t)$

$$nD2(t) = D(t, s < T + 6) \times K2(t) \times K1(t), \quad (6.4)$$

для $t = T+1, \dots, T+6$.

Данные заносятся в таблицу 6.4.

Таблица 6.4 – Прогнозирование количества отказов

Дата	T-6	T-1	T	T+1	T+6
Прогнозируемое количество отказов					

3.3 Вычисляются средние отказы по периодам до и после внедрения мероприятий.

$$d1 = \frac{\sum nD1(t)}{N1}; \quad (6.5)$$

$$d2 = \frac{\sum nD2(t)}{N2}; \quad (6.6)$$

где N1 – суммарный выпуск ЭМБ и АКЭУ за период T-6 - ... -T-1;

N2 – суммарный выпуск ЭМБ и АКЭУ за период T+1 - ... -T+6.

3.4 Вычисляются средние общие затраты на один отказ по периодам до и после внедрения мероприятий.

$$Z1 = \frac{\sum ZO(t,s \leq T+6)}{\sum D(t,s \leq T+6)}; \quad (6.7)$$

для t = T-6, ..., T-1.

$$Z2 = \frac{\sum ZO(t,s \leq T)}{\sum D(t,s \leq T)}; \quad (6.8)$$

для t = T+1, ..., T+6.

3.5 Вычисляются общие затраты по выпускам до внедрения мероприятий

$$ZO1 = N1 \times d1 \times Z1. \quad (6.9)$$

3.6 Вычисляются общие затраты по выпускам после внедрения мероприятий

$$ZO2 = N2 \times d2 \times Z2. \quad (6.10)$$

3.7 Вычисляются доли затрат на услуги и запасные части и материалы для данных до внедрения мероприятий

$$h1 = \frac{\sum ZU(t,s \leq T+6)}{\sum ZO(t,s \leq T+6)}; \quad (6.11)$$

для t = T-6, ..., T-1,

$$h2 = 1 - h1. \quad (6.12)$$

3.8 Вычисляются прогнозируемые затраты на услуги и запасные части и материалы

$$ZU1 = h1 \times ZO1; \quad (6.13)$$

$$ZZ1 = h2 \times ZO1. \quad (6.14)$$

4 Вычисляются приведенные общие затраты по выпускам до внедрения мероприятий

$$Zn01 = ZU1 \times Ku + ZZ1 \times Kz \quad (6.15)$$

где Ku – коэффициент приведения затрат на услуги;

Kz – коэффициент приведения затрат на запасные части и дополнительные материалы.

Коэффициент приведения затрат на услуги Ku определяется через отношение средних стоимостей нормо-часа на предприятиях технического обслуживания ЭМБ и АКЭУ за периоды 6 месяцев после и до внедрения мероприятий по улучшению надежности ЭМБ и АКЭУ, коэффициент приведения затрат на запасные части и дополнительные материалы Kz определяется через отношение средних стоимостей деталей, узлов, отпускаемых для гарантийного ремонта.

5 Вычисляется изменение затрат

$$\Delta ZO = Zn01 - ZO2. \quad (6.16)$$

В качестве примера, приведем расчет оценки эффективности внедрения мероприятий направленных на повышение надежности датчика уровня жидкости омывателя с кодом отказа 3839410-025-000 для автомобилей одного из ведущих автопроизводителей России.

Дата внедрения мероприятий: Т = июль 2011 г.

$N1 = 100492$, $N2 = 81321$.

Расчет характеристик отказа по неполным данным (таблицы 6.5, 6.6).

Таблица 6.5 – Данные гарантии по дате регистрации ≤ январь 2012

Дата	Июл. 2010	Авг. 2010	Сен. 2010	Окт. 2010	Ноя. 2010	Дек. 2010	Янв. 2011	Фев. 2011	Мар. 2011
Отк.	441	671	371	589	251	251	253	437	168
Затр.	38711	61546	34324	59549	25497	24939	25143	43916	16011
Вып.	17775	18003	16479	19339	16721	15820	15431	17128	16881

Продолжение таблицы 6.5

Дата	Апр. 2011	Май 2011	Июн 2011	Июл. 2011	Авг. 2011	Сен. 2011	Окт. 2011	Ноя. 2011	Дек. 2011
Отк.	121	156	160	190	133	64	21	15	3
Затр.	13851	16522	16643	19277	12598	6643	2439	1961	314
Вып.	18740	15291	17023	17943	19334	17980	15134	9127	10196

Таблица 6.6 – Данные гарантии по дате устранения ≤ июнь 2012

Дата	Июл. 2010	Авг. 2010	Сен. 2010	Окт. 2010	Ноя. 2010	Дек. 2010	Янв. 2011	Фев. 2011	Мар. 2011
Отк.	413	601	304	431	151	145	157	278	81
Затр.	35976	54528	27728	44581	15652	14643	15568	26663	7404

Продолжение таблицы 6.6

Дата	Апр. 2011	Май 2011	Июн 2011
Отк.	38	32	18
Затр.	4212	3556	1819

Расчет коэффициентов для перехода к прогнозируемым количествам отказов.

Вычисление величин коэффициентов $K1(t)$ для $T-12, \dots, T-7$. Для расчета из первой строки таблицы 6.5 для дат июль 2010 – декабрь 2010, числа делятся на соответствующие числа второй строки таблицы 6.6.

Расчет величин коэффициентов $K2(t)$ для $T-6, \dots, T-1$. Для расчета из второй строки таблицы 6.5. для дат январь 2011 – июнь 2011, числа делятся на соответствующие числа второй строки таблицы 6.6.

В таблице 6.7 представлены коэффициенты прогнозирования $K1(t)$, $K2(t)$.

Таблица 6.7 – Коэффициенты прогнозирования $K1(t)$, $K2(t)$.

$K1$	1,07	1,12	1,22	1,37	1,66	1,73
$K2$	1,61	1,57	2,07	3,18	4,88	8,89

Прогнозирование количества отказов. Вычисление величин $nD1(t)$, для $T-6, \dots, T-1$. Для расчета числа из второй строки таблицы 6.8 для дат январь 2011 – июнь 2011 умножаются на соответствующие числа из первой строки таблицы 6.7.

Вычисление величин $nD2(t)$, для $T+1, \dots, T+6$. Для расчета числа из второй строки таблицы 6.5 для дат январь 2011 – июнь 2011 умножаются на соответствующие числа из первой строки таблицы 6.7, а затем на соответствующие числа второй строки таблицы 6.7.

В таблице 6.8 представлены данные по прогнозированию числа отказов.

Таблица 6.8 – Прогнозирование числа отказов

Дата	Янв. 2011	Фев. 2011	Мар. 2011	Апр. 2011	Май 2011	Июн. 2011	Июл. 2011	Авг. 2011	Сен. 2011
Отк.	270	488	205	165	259	277	-	229	112

Продолжение таблицы 6.8

Дата	Окт. 2011	Нояб. 2011	Дек. 2011	Янв. 2012
Отк.	53	65	24	0

Расчет среднего уровня отказов по периодам до и после внедрения мероприятий по повышению надежности.

Для расчета используется вторая строка таблицы 6.8.

$$d1 = (270+488+205+165+259+277) / 100494 \times 1000 = 16,57 \text{ отк. / (1000 а/м).}$$

$$d2 = (229+112+53+65+24+0) / 71744 \times 1000 = 6,75 \text{ отк. / (1000 а/м).}$$

Расчет средних общих затрат на устранение одного отказа по периодам до и после внедрения мероприятий ($Z1, Z2$). Для расчета суммируются затраты по третьей строке таблицы 6.5 и результата делится на суммарное количество отказов по второй строке этой же таблицы.

$$Z1 = (25143+43916+16011+13851+16522+16643) / (253+437+168+121+156+160) = 102 \text{ руб./отк.}$$

$$Z2 = (12598+6643+2439+1961+314+0) / (133+64+21+15+3+0) = 101,5 \text{ руб./отк.}$$

Расчет общих затрат по выпускам шести месяцев до внедрения мероприятий.

$$ZO1 = 100494 \times 16,57 \times 102 = 169795,43 \text{ руб.}$$

Расчет общих затрат по выпускам шести месяцев после внедрения мероприятий.

$$ZO2 = 71744 \times 6,75 \times 101,5 = 49119,46 \text{ руб.}$$

Принимаем коэффициент приведенных затрат по Код отказа, связанный с инфляционными процессами (Ккод.отк.)

$$\text{Ккод.отк.} = 1,2.$$

Расчет приведенных общих затрат по выпускам до внедрения мероприятий:

$$ZnO1 = 169795,43 \times 1,2 = 203754,51 \text{ руб.}$$

Расчет изменения затрат в сопоставимых ценах на полугодовых выпусках до и после внедрения мероприятий:

$$\Delta ZO = 203754,51 - 49119,46 = 154635,06 \text{ руб.}$$

6.2 Оценка эффективности повышения надежности ЭМБ и АКЭУ с учетом изменения цены и удовлетворенности потребителей

Методика разработана с целью поиска оптимального решения при повышении качества и надежности ЭМБ и АКЭУ с учетом цены применяемых комплектующих изделий и удовлетворенности потребителей [144, 150, 159].

Результаты расчетов используются для анализа эффективности применения автокомпонентов улучшению качества при производстве ЭМБ и АКЭУ.

Расчет эффективности мероприятий направленных на повышение надежности проводится с учетом затрат на производство, затрат в эксплуатации, возможных потерь от изменения.

Данные и обозначения для проведения расчета эффективности приведены в таблицах 6.9 – 6.13.

Таблица 6.9 – Данные о цене детали/узла

№	Поставщики	Наименование детали/узла	Цена детали/узла	РРМ в гарантии	Источник данных
1	Основной		Цосн	РРМосн	Расчет
2	Альтернативный		Цальт	РРМальт	Поставщик

Таблица 6.10 – Данные о цене ЭМБ и АКЭУ

№	Показатель	Обозначение
1	Средняя цена а/м за 200X год	Ца/м
2	Рентабельность (прибыльность)	Крент

Таблица 6.11 – Данные о выпуске ЭМБ и АКЭУ

№	Показатель	Обозначение
1	Фактическая программа выпуска а/м на 200X год	N
2	Фактический выпуск на внутренний рынок на 200X год	Nвнутр

Таблица 6.12 – Данные из гарантии по отказам ЭМБ и АКЭУ, выпущенных за 200X год

№	Наименование	Обозначение
1	Общее количество отказов	Мотк.общ.
2	Общее количество отказов по детали/узлу	Мотк.дет.
3	Общие затраты по отказам детали/узла	Zотк.общ.
4	Доля отказов по детали/узлу в общем количестве отказов	Дотк.
5	Общие затраты по детали/узлу на один выпущенный ЭМБ и АКЭУ	Zа/м

Таблица 6.13 – Данные об удовлетворенности потребителей

№	Наименование	Обозначение
1	Удовлетворенность потребителей по надежности	Унад
2	Весовой коэффициент при расчете удовлетворенности по надежности	Кнад
3	Коэффициент прироста лояльности	Клоял

Расчет эффективности мероприятий направленных на повышение надежности проводится с учетом затрат на производство, затрат в эксплуатации, возможных потерь от изменения.

Алгоритм расчета эффективности

1 Расчет изменения затрат на производство ($\Delta_{пр}$)

$$\Delta_{пр} = (Ц_{осн} - Ц_{альт}) \times N, \quad (6.17)$$

где $Ц_{осн.}$, $Ц_{альт.}$ – цена автокомпонента основного и альтернативного поставщика;

N – программа выпуска ЭМБ и АКЭУ в год.

2 Расчет изменения затрат в гарантии.

2.1 Расчет уровня отказов продукции основного поставщика $PPM_{осн.}$

$$PPM_{осн} = \frac{M_{отк.дет.}}{N} \times 1\,000\,000, \quad (6.18)$$

где $M_{отк.дет.}$ – общее количество отказов по детали или узлу.

2.2 Расчет затрат в гарантии по отказу на один выпущенный ЭМБ и АКЭУ

$$Z_{a/м} = \frac{Z_{отк.общ.}}{N}, \quad (6.19)$$

где $Z_{отк.общ.}$ – общие затраты по устранению отказов детали или узла.

2.3 Расчет затрат в гарантии на программу по основному поставщику ($Z_{гар.осн.}$)

$$Z_{гар.осн.} = Z_{a/м} \times N, \quad (6.20)$$

где $Z_{a/м}$ – общие затраты по детали или узлу на один выпущенный ЭМБ и АКЭУ.

2.4 Расчет (прогноз) затрат в гарантии на программу по альтернативному поставщику ($Z_{гар.альт.}$)

$$Z_{гар.альт.} = \frac{Z_{гар.осн.}}{PPM_{осн.} \times PPM_{альт.}} \quad (6.21)$$

2.5 Расчет изменения затрат в гарантии ($\Delta_{гар.}$)

$$\Delta_{гар.} = Z_{гар.осн.} - Z_{гар.альт.} \quad (6.22)$$

3 Расчет изменения потерь от удовлетворенности потребителей.

3.1 Расчет изменения удовлетворенности потребителей по надежности

$$\Delta_{над.удовл.} = (10 - U_{над.}) \times K_{над.} \times D_{отк.}, \quad (6.23)$$

где $U_{над.}$ – удовлетворенность потребителей по надежности;

Кнад. – весовой коэффициент при расчете удовлетворенности потребителей по надежности ЭМБ и АКЭУ;

Дотк. – доля отказов по детали или узлу в общем количестве отказов.

3.2 Расчет изменения лояльности потребителей (Δ лоял.)

$$\Delta \text{лоял.} = K \text{лоял.} - \Delta \text{над. удовл.}, \quad (6.24)$$

где $K \text{лоял.}$ – коэффициент прироста лояльности.

3.3 Расчет количества потерянных покупателей (повторных покупок) (Δ пок.)

$$\Delta \text{пок.} = \frac{\Delta \text{лоял.}}{10 \times N}, \quad (6.25)$$

3.4 Расчет потерь от удовлетворенности (Δ удовл.)

$$\Delta \text{удовл.} = \Delta \text{пок.} \times \text{Цавт.} \times K \text{рент.}, \quad (6.26)$$

где Цавт. – цена ЭМБ и АКЭУ;

$K \text{рент.}$ – коэффициент рентабельности производства.

4 Расчет полного изменения затрат (Δ)

$$\Delta = \Delta \text{пар.} + \Delta \text{гар.} + \Delta \text{удовл.} \quad (6.27)$$

Примеры расчета по методике оценки эффективности изменения конструкции и технологии изготовления автомобилей с учетом изменения цены, качества и удовлетворенности потребителей представлены в таблицах 6.14 – 6.19.

Таблица 6.14 – Изделие – патрубок дроссельный. Исходные данные к расчету

Данные о цене			Данные в гарантии по основному поставщику				
Поставщики	Деталь	Цена (ДПДЗ) руб.	Код изделия	Код отказа	количество отказов	% в общем числе отказов	общие затраты, руб.
Основной		107	1148200	000	17611	4,26%	7 925712
Альтернативный	CTS, Канада (ДПДЗ)	290,27	1148010	000	5885	1,42%	6 113139
Цена а/м		220000	Всего		23496	5,69%	14 038 851
Рентабельность продаж		23,00 %					
			Данные об удовлетворенности потребителей				
Данные о выпуске			Удовлетворенность потребителей по надежности				6,8
Программа производства		220000	Весовой коэффициент по надежности				0,259
Внутренний рынок		194027	Коэффициент лояльности				1,1676

Таблица 6.15 – Изделие – патрубок дроссельный. Расчет параметров эффективности

Поставщ.	Патрубок дросс.	PPM в гарантии	Затр. на произв. програм, руб.	Затр. в гарантии на вып. 1 а/м, руб.	Затр. в гар. на програм., руб.	Потери от удовл. потр., руб.	
Основной	ДААЗ	121097	23 540 000	72,36	15918 131	61285354	
Альтерн.	СТS, Канада ДПДЗ	50	63 859 400		6 572		Итого, руб.
Изменен.			-40319400		15911 559	61285 354	36 877513

Таблица 6.16 – Изделие – генераторная установка. Исходные данные к расчету

Данные о цене			Данные в гарантии по основному поставщику				
Поставщики	Деталь	Цена руб.	Отказы	Код отказа	Количество отказов	% в общем числе отказов	общие затраты
Основной	2112-3701010 "ЗиТ"	1021,91	3701010	096	2257	0,55%	3 274 795
Альтернативны	"Бош" 2112-3701010-1	1302,21	3701010	179	1489	0,36%	2 242 402
Цена а/м	220000		3701010	145	1227	0,30%	1 925 369
Рентабельность продаж	23,00%		3701010	179	614	0,15%	926 283
Данные о выпуске			3701010	000	347	0,08%	457 343
Программа производства	220000		3701010	086	103	0,02%	96 603
Внутренний рынок	194027		Всего		6037	1,20%	8 922 795
			Данные об удовлетворенности потребителей				
			Удовлетворенность потребителей по надежности				6,8
			Весовой коэффициент по надежности				0,259
			Коэффициент лояльности				1,1676

Таблица 6.17 – Изделие – генераторная установка. Расчет параметров эффективности.

Поставщики	Генераторная установка	PPM в гарантии	Цена	Затраты на производственную программу
Основной	2112-3701010 "ЗиГ"	31114	1021,91	224820 200
Альтернативны	"Бош" 2112- 3701010-1	50	1302,21	286486 200
Изменение			-280,3	-61666000

Продолжение таблицы 6.17

Поставщики	Затраты в гарантии на 1 вып. а/м	Затраты в гарантии на программу	Потери от удовлетворенности потребителей
Основной	45,99	10117 225	12 971232
Альтернативны		16 258	0
Изменение		10100 967	12 971232

Таблица 6.18 – Изделие – электростартер. Исходные данные к расчету.

Данные о цене			Данные в гарантии по основному поставщику				
Поставщики		Цена руб.	Отказы	Код отказа	Количество отказов	% в общем числе отказов	общие затраты
Основной	2110-3708010	922,60	3708010	096	1982	0,48%	2 556323
Альтернативный	"Бош" 2110- 3708010-03	948,28					
Цена а/м	220000		3708010	025	175	0,28%	1 566600
Рентабельность продаж	23,00%		3708010	182	516	0,12%	698 651
Данные о выпуске			3708010	183	513	0,12%	709718
Программа производства	220000		3708010	86	45	0,01%	17922
Внутренний рынок	194027		3708010	83	1	0,02%	1 866
			Всего		4232	0,89%	5 551080
Данные об удовлетворенности потребителей							
			Удовлетворенность потребителей по надежности				6,8
			Весовой коэффициент по надежности				0,259
			Коэффициент лояльности				1,1676

Таблица 6.19 – Изделие - электростартер. Расчет параметров эффективности.

Поставщики	Электростартер	РРМ в гарантии	Цена	Затраты на производственную программу
Основной	2110-3708010	21811	922,6	202 972 000
Альтернативны	"Бош" 2110-3708010-03	50	948,28	208 621 600
Изменение			-25,68	-5 649 600

Продолжение таблицы 6.19

Поставщики	Затраты в гарантии на 1 вып. а/м	Затраты в гарантии на программу	Потери от удовлетворенности потребителей	
Основной	28,61	6 294 163	9 580 401	
Альтернативны		14 429	0	Итого
Изменение		6 279 735	9 580 401	10 210 536

Оценка лояльности потребителей

Для расчета коэффициента лояльности по каждой модели марки ЭМБ и АКЭУ необходимо наряду с удовлетворенностью потребителей проводить опросы по лояльности. Варианты анкет для такого опроса приведены далее. Каждый вариант анкеты содержит шесть вопросов. С помощью коэффициентов значимости оценки по вопросам сворачиваются в интегрированную оценку лояльности Плоял (таблица 6.20).

Таблица 6.20 – Пример анкеты для оценки лояльности потребителя

Вопросы	Оценка	Коэффициенты значимости
1	2	3
1) Насколько вероятно то, что следующим Вашим ЭМБ (АКЭУ) будет также какая-либо модель марки ...?	X1	K1/2
2) Намерены ли вы перейти к покупке и использованию ЭМБ (АКЭУ) другой марки (не ...), и какова вероятность этого?	X2	-K1/2

Продолжение таблицы 6.20

1	2	3
3) Намерены ли вы совершить покупку ЭМБ (АКЭУ) марки ... в качестве второго ЭМБ (АКЭУ) в Вашей семье - для своей жены, детей, других близких родственников, и насколько это вероятно?	X3	K3
4) Намерены ли вы рекомендовать покупку и использование ЭМБ (АКЭУ) марки ... другим возможным покупателям из Вашего окружения: Ваших друзей, близких, знакомых?	X4	K4
5) Насколько Вы цените наличие ЭМБ (АКЭУ) марки ... у своих друзей, знакомых, родственников, на предприятии в качестве служебного автомобиля?	X5	K5
6) Насколько для Вас важно присутствие ЭМБ (АКЭУ) марки ... на российском рынке автомобилей в дальнейшем?	X6	K6

где сумма всех коэффициентов значимости равна 1.

Интегрированная оценка лояльности Плял. по каждой анкете рассчитывается по следующей формуле

$$\text{Плял} = \frac{K1 \times (X1 + (10 - X2))}{2} + K3 \times X3 + K4 \times X4 + K5 \times X5 + K6 \times X6. \quad (6.28)$$

Вопрос 2 фактически дублирует вопрос 1. Отвечая на первый вопрос анкетиремый оценивает вероятность последующей покупки ЭМБ (АКЭУ) марки ..., отвечая на второй – вероятность перехода на другую марку. Поэтому оценки X1 и (10 - X2) есть вероятности того, что потребитель останется лояльным марке ...

Пример анкеты для оценки лояльности приведен в таблице 6.21.

Вариант анкеты для оценки лояльности потребителей.

Лояльность марке (дайте оценку различным параметрам лояльности по 10 – бальной шкале).

1 Насколько вероятно то, что следующим Вашим ЭМБ (АКЭУ) будет также какая-либо модель марки ... ? (с учетом совершенствования моделей, выпуска новых моделей)

Таблица 6.21 – Пример заполненной анкеты лояльности потребителя

Вопрос	Поставленные баллы	Коэффициент
1	9	+0,25
2	2	-0,25
3	1	+0,2
4	7	+0,1
5	6	+0,1
6	7	+0,1

2 Намерены ли вы перейти к покупке и использованию ЭМБ (АКЭУ) другой марки (не ...), и какова вероятность этого?

Если это вероятно, то с чем это в большей мере для Вас связано?

Нехватка средств на обслуживание, хочу приобрести более дешевый ЭМБ (АКЭУ)	Появились дополнительные средства, возможна покупка более дорогого ЭМБ (АКЭУ)
--	---

3 Намерены ли вы совершить покупку ЭМБ (АКЭУ) марки ... в качестве второго автомобиля в Вашей семье – для своей жены, детей, других близких родственников, и насколько это вероятно?

4 Намерены ли вы рекомендовать покупку и использование ЭМБ (АКЭУ) марки ... другим возможным покупателям из Вашего окружения: Ваших друзей, близких, знакомых? (1 – намного более намерен рекомендовать им другие марки автомобилей, чем марку ..., 5 – намерен рекомендовать им эту марку также как и другие марки, 10 – намерен им рекомендовать для покупки скорее марку ..., чем другие марки).

5 Насколько Вы цените наличие ЭМБ (АКЭУ) марки ... у своих друзей, знакомых, родственников, на предприятии в качестве служебного автомобиля?

6 Насколько для Вас важно присутствие ЭМБ (АКЭУ) марки ... на российском рынке автомобилей в дальнейшем?

Вычисление коэффициента лояльности

Формула вычисления лояльности по удовлетворенности. Связь между удовлетворенностью и лояльностью покупателей для ЭМБ и АКЭУ предполагается в виде

$$\text{Плоял} = 1 + 9 \times \left(\frac{\text{Пудовл}-1}{9} \right)^\alpha, \quad (6.29)$$

где Плоял – потребительская лояльность;

Пудовл – потребительская удовлетворенность;

α – показатель степени.

Определение показателя степени. Для определения показателя степени α по значениям Плоял и Пудовл применяется формула

$$\alpha = \frac{\text{Ln}(\text{Плоял}-1)-\text{Ln}(9)}{\text{Ln}(\text{Пудовл}-1)-\text{Ln}(9)}. \quad (6.30)$$

Примеры вычисления показателя α приведены в таблице 6.22.

Таблица 6.22 – Расчет показателя степени α

Модель/Параметр	Пудовл	Плоял	Знаменатель	Числитель	α
Opel	7,81	7,40	-0,28	-0,34	1,22
Toyota	7,96	7,72	-0,26	-0,29	1,14
VW	7,57	7,28	-0,31	-0,36	1,14
Nissan	7,93	7,52	-0,26	-0,32	1,23
Renault	7,76	7,35	-0,29	-0,35	1,22
Mazda	7,70	7,28	-0,30	-0,36	1,22
Lancia	7,54	6,65	-0,32	-0,47	1,46
Alfa Romeo	7,70	8,20	-0,30	-0,22	0,76
Fiat	7,18	6,35	-0,38	-0,52	1,38
Citroen	6,93	6,75	-0,42	-0,45	1,07
Kia	7,34	6,98	-0,35	-0,41	1,17
Hyundai	7,50	7,48	-0,33	-0,33	1,01
All Others	7,55	7,08	-0,32	-0,39	1,23

Вычисление коэффициента лояльности. Коэффициент лояльности вычисляется по формуле

$$\text{Клоял} = \alpha \times \left(\frac{\text{Пудовл}-1}{9} \right)^{\alpha-1}. \quad (6.31)$$

Примеры вычисления коэффициента лояльности приведены в таблице 6.23.

Таблица 6.23 – Примеры расчета коэффициента лояльности

Модель/Параметр	Пудовл	альфа	К лояльн
Opel	7,81	1,22	1,15
Toyota	7,96	1,14	1,10
VW	7,57	1,14	1,09
Nissan	7,93	1,23	1,16
Renault	7,76	1,22	1,14
Mazda	7,70	1,22	1,14
Lancia	7,54	1,46	1,26
Alfa Rome	7,70	0,76	0,81
Fiat	7,18	1,38	1,20
Citroen	6,93	1,07	1,04
Kia	7,34	1,17	1,10
Hyundai	7,50	1,01	1,01
All Others	7,55	1,23	1,15

6.3 Полиномиальные модели в оптимизации комплексных показателей надежности комплекса электрооборудования ЭМБ и АКЭУ

В условиях повышения конкуренции между автопроизводителями на Российском рынке, которое мы сегодня наблюдаем, актуализируется проблема необходимости внедрения в практику предприятий методов ориентированных на оптимизацию затрат на качество продукции и услуг. Среди таких методов выделяются: концепция всеобщего блага для общества, разработанная Генити Тагути; метод оценки затрат, связанных с качеством по модели PAF; модель стоимости процессов [144].

Нам представляется, что базой формирования приведенных выше методов управления затратами является японская методология организации бережливого производства, ключевым моментом которой является создание ценности (продукта). При создании ценности входные параметры процессов предприятия – это характеристики продукции необходимой потребителю. На выходе получают продукт максимально приближенный к требованиям потребителя. При этом реализуются принципы вовлечения персонала в процесс улучшения за счет соответ-

вующей мотивации и обеспечение прозрачности и упрощения процессов за счет исключения из них всего лишнего. Происходит снижение затрат при одновременном повышении качества различных видов деятельности.

В любой системе улучшения, важным этапом является процесс вскрытия проблем. Проблемы нужно классифицировать: по степени важности, по объемам необходимых ресурсов, по ожидаемому эффекту [144].

В представленной работе мы предлагаем собственное видение процесса оптимизации надежности электрооборудования на этапах проектирования и производства исходя из данных отражающих затраты в эксплуатации.

Надежность любого технического объекта характеризуется совокупностью показателей безотказности и ремонтпригодности. На практике чаще всего безотказность измеряется вероятностью безотказной работы (ВБР), а ремонтпригодность – полными затратами на устранение отказов. При этом, на предприятиях, показатели в основном измеряются отдельно: надежность для оценки качества, затраты при измерении бюджета на гарантийное обслуживание.

На рисунке 6.1 (а) представлены кривые изменения вероятности безотказной работы (1) и затрат на ее обеспечение (2) при изменении пробега (L) проекта ЭМБ (АКЭУ) в пределах гарантийного периода эксплуатации, в относительных единицах (процентах). Показатель затрат (Z) рассчитывается в виде накопленной суммы затрат на устранение отказов по интервалам пробега.

Для определения зависимости вероятности безотказной работы от эксплуатационного пробега ЭМБ и АКЭУ, а также зависимости затрат на обеспечение надежности от безотказности, на основе данных по отказам автомобилей в эксплуатации разработана полиномиальная модель [158]

$$\begin{aligned}
 P_{ij}(l) = & p1_{ij} \cdot l(i)^{15} + p2_{ij} \cdot l(i)^{14} + p3_{ij} \cdot l(i)^{13} + p4_{ij} \cdot l(i)^{12} + p5_{ij} \cdot l(i)^{11} + \\
 & + p6_{ij} \cdot l(i)^{10} + p7_{ij} \cdot l(i)^9 + p8_{ij} \cdot l(i)^8 + p9_{ij} \cdot l(i)^7 + p10_{ij} \cdot l(i)^6 + \\
 & + p11_{ij} \cdot l(i)^5 + p12_{ij} \cdot l(i)^4 + p13_{ij} \cdot l(i)^3 + p14_{ij} \cdot l(i)^2 + p15_{ij} \cdot l(i) + p16_{ij}
 \end{aligned} \quad (6.32)$$

$$Z_n(P) = z_1 \cdot P^{15} + z_2 \cdot P^{14} + z_3 \cdot P^{13} + z_4 \cdot P^{12} + z_5 \cdot P^{11} + \\ + z_6 \cdot P^{10} + z_7 \cdot P^9 + z_8 \cdot P^8 + z_9 \cdot P^7 + z_{10} \cdot P^6 + z_{11} \cdot P^5 + \\ + z_{12} \cdot P^4 + z_{13} \cdot P^3 + z_{14} \cdot P^2 + z_{15} \cdot P + z_{16}$$

где Z_n – затраты на устранение отказов;

P – вероятность безотказной работы;

$p_1 \dots p_{16}, z_1 \dots z_{16}$ – коэффициенты полиномиальных уравнений.

На рисунке 6.1 (б) представлена кривая отражающая зависимость изменения затрат в функции надежности.

Кривая, представленная на рисунке 6.1 (б), содержит точку M , с помощью которой координатную ось можно разделить на две области.

Первая область характеризуется изменением ВБР от 1 до 0,18. Здесь снижение безотказности сопровождается незначительным увеличением затрат. Вторая область характеризуется изменением ВБР от 0,18 до 0. Здесь изменение безотказности сопровождается значительным ростом затрат.

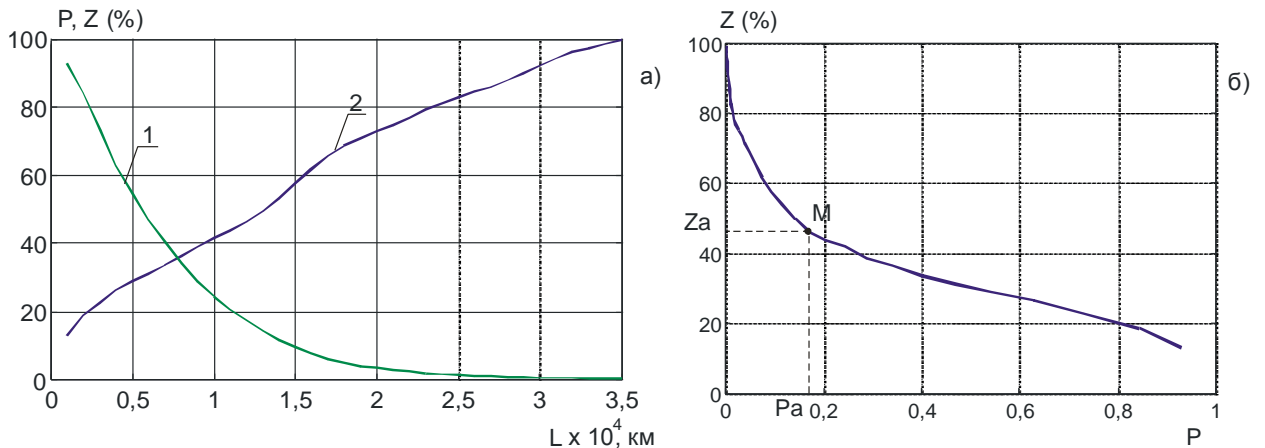


Рисунок 6.1 – Динамика изменения надежности и затрат ЭМБ (АКЭУ) в эксплуатации

Из анализа рисунка 6.1 можно сделать важный вывод о наличии проблем в области надежности ЭМБ (АКЭУ) в диапазоне изменения безотказности от 0,18 до 0 при $L > 12\,000$ км. В этот период происходит значительное увеличение затрат на обеспечение надежности.

Для определения динамики процесса изменения затрат в функции безотказности, можно продифференцировать исходное уравнение (6.32) по ВБР. В итоге получаем уравнение скорости процесса. Точка M рисунке 6.1 (б) отражает пере-

ход исследуемых показателей надежности из области низких в область высоких затрат. Выделим элементы автомобилей, отказы которых соответствуют выделенному периоду эксплуатации.

В результате работы нами выделена группа элементов имеющая наихудшие показатели надежности. Значительная часть элементов группы относится к комплексу электрооборудования. Особое место в группе занимают изделия, имеющие в своем составе электромеханические преобразователи: генератор, и электростартер.

Рассмотрим изменение ВБР и затрат на устранение отказов электрооборудования в функции пробега с помощью рисунка 6.2 (а и б).

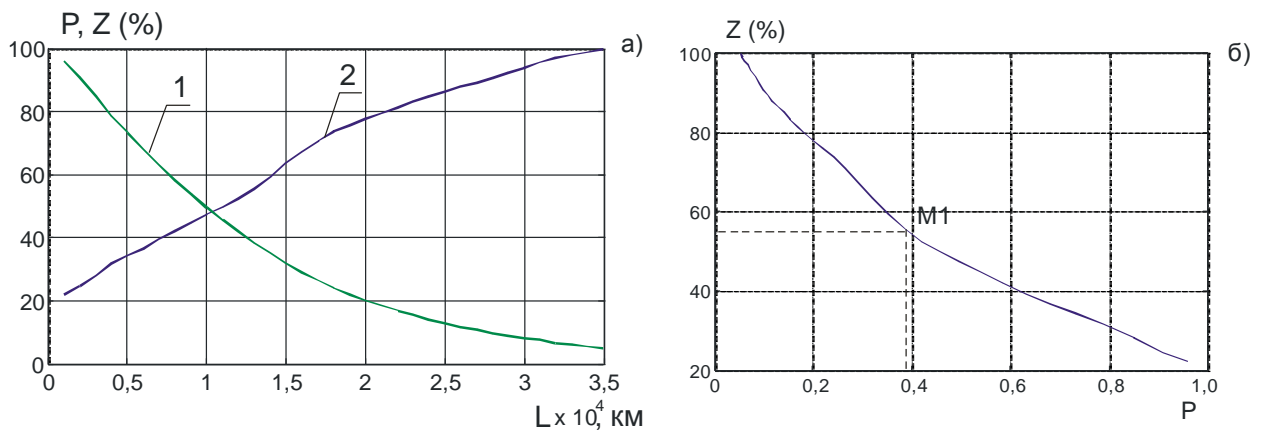


Рисунок 6.2 – Динамика изменения надежности и затрат комплекса электрооборудования ЭМБ (АКЭУ)

На рисунке 6.2 (а) представлены кривые изменения ВБР (1) и затрат (2) в функции пробега. На рисунке 6.2 (б) представлена кривая изменения затрат на обеспечение надежности в функции безотказности.

Анализ рисунка 6.2 показывает, что в период $L > 12\ 000$ км также, как и в предыдущем случае, отмечается значительный рост затрат при уменьшении безотказности, что подтверждает высокую значимость системы электрооборудования в формировании надежности автомобиля на данном этапе.

На рисунке 6.3, в качестве примера, представлены кривые распределения исследуемых показателей надежности для генератора и электростартера.

Анализ рисунка 6.3 показывает, что вероятность безотказной работы генератора имеет значительно меньшее значение в сравнении с электростартером. При

этом, для электростартера (рисунок 6.3 в) характерен резкий рост затрат на обеспечение надежности начиная с 12 000 км эксплуатации АТС, а для генератора резкий рост затрат происходит уже на раннем этапе эксплуатации при $L < 5 000$ км и постепенно сглаживается до $L = 35 000$ км. Рисунок 6.3 (б и г) подтверждают указанную выше тенденцию). Для электростартера характерно более равномерное распределение кривой $Z(P)$.

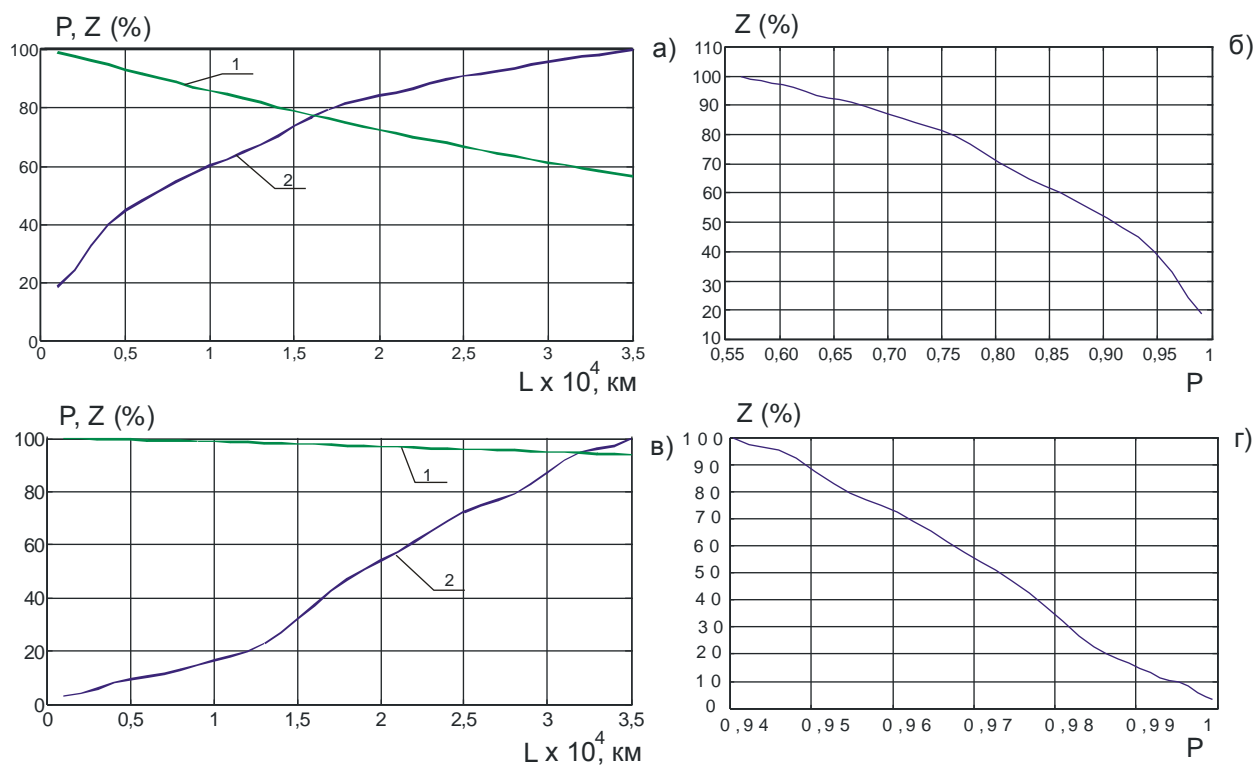


Рисунок 6.3 – Динамика изменения надежности и затрат генератора (а, б) и электростартера (в, г)

6.4 Прогнозирование эффективности мероприятий по улучшению комплексных показателей надежности в производстве

В процессе производства в сравнении с эксплуатацией наблюдается естественное более оперативное реагирование на возникающие несоответствия. Поэтому для организации процесса измерения затрат до и после внедрения мероприятий достаточно ограничиться 30 дневным временным интервалом, т.е. отчетными месяцами до и после реализации мероприятий. Производственный процесс сопровождают собственные информационные источники, так называемые внутренние

информационные системы, в которых регистрируются и анализируются показатели качества и надежности продукции [158].

Необходимыми показателями для организации методики являются:

T_v – дата внедрения мероприятий по улучшению надежности;

$D(t, K_{\text{код.отк.}})$ – уровень отказов ЭМБ и АКЭУ с датой выпуска t (день) по коду отказа $K_{\text{код.отк.}}$;

$ZO(t, K_{\text{код.отк.}})$ – уровень средних затрат на устранение отказов с заданным кодом отказа $K_{\text{код.отк.}}$ на автомобилях с датой выпуска t .

Расчет затрат [135]. Вычисление характеристик отказа до внедрения мероприятий.

1 Расчет величины $D(T_v-30 \leq t \leq T_v-1, K_{\text{код.отк.}})$.

2 Расчет величины $ZO(T_v-30 \leq t \leq T_v-1, K_{\text{код.отк.}})$.

Расчет характеристик отказа после внедрения мероприятий по улучшению надежности.

3 Расчет величины $D(T_v+1 \leq t \leq T_v+30, K_{\text{код.отк.}})$.

4 Расчет величины $ZO(T_v+1 \leq t \leq T_v+30, K_{\text{код.отк.}})$.

5 Вычисление изменения уровня отказов

$$\Delta D = D(T_v-30 \leq t \leq T_v-1, K_{\text{код.отк.}}) - D(T_v+1 \leq t \leq T_v+30, K_{\text{код.отк.}}). \quad (6.33)$$

6 Вычисление изменения уровня затрат на устранение отказов

$$\Delta ZO = ZO(T_v-30 \leq t \leq T_v-1, K_{\text{код.отк.}}) - ZO(T_v+1 \leq t \leq T_v+30, K_{\text{код.отк.}}). \quad (6.34)$$

6.5 Прогнозирование эффективности мероприятий по улучшению комплексных показателей надежности по сложным рекламациям.

Система организации индивидуального отзыва ЭМБ и АКЭУ

Сложные рекламации [118]. Современная автомобильная промышленность характеризуется факторами улучшения технико-технологических характеристик основных конструкторских, производственных и сервисных процессов, а также усложнением проектов новых АТС за счет активного внедрения систем безопасности, экологичности и комфорта. При этом далеко не всегда корпорациям удается

ся в полной мере минимизировать риски связанные с проявлением критических отказов. Критические это такие отказы ЭМБ или АКЭУ, при проявлении которых эксплуатация АТС не возможна по техническим причинам или по требованиям обеспечения безопасности. Следствием возникновения критических отказов, является соответствующее заявление потребителя к автопроизводителю ведущее к формированию сложной рекламации. Во некоторых случаях причиной сложных рекламаций являются нарушения правил эксплуатации ЭМБ и АКЭУ автовладельцами. Наиболее распространенные примеры таких нарушений это подключение в бортовую сеть не рекомендованных электронных или электротехнических устройств в бортовую сеть, что иногда приводит к коротким замыканиям. Последствием данных отклонений является возгорание автомобиля. Следует признать, что конструкторские и производственные отклонения у автопроизводителей влекут возникновение критических отказов и соответственно сложных рекламаций. При этом в эксплуатацию может попасть некоторое количество ЭМБ и АКЭУ с потенциальными отказами.

Организация индивидуального отзыва ЭМБ и АКЭУ [155]. С целью снижения рисков экономических и имиджевых потерь, автопроизводители проводят компании по организации индивидуальных отзывов автомобилей. Для предприятий это целый процесс, который имеет важной значение, как сточки зрения снижения проблем в эксплуатации, так и с точки зрения недопущения и минимизации потери удовлетворенности и лояльности потребителей.

Для того, чтобы того, чтобы подчеркнуть актуальность затронутой темы, нами проведено исследование отзывных компаний лидеров мировой автомобильной промышленности в течении 2013г. Полученные из порядка 150 информационных источников данные, позволили разработать инструмент исследования, позволяющий реализовать функцию перекрестного анализа и сопоставления информации поступающей через СМИ(рисунок 6.4).

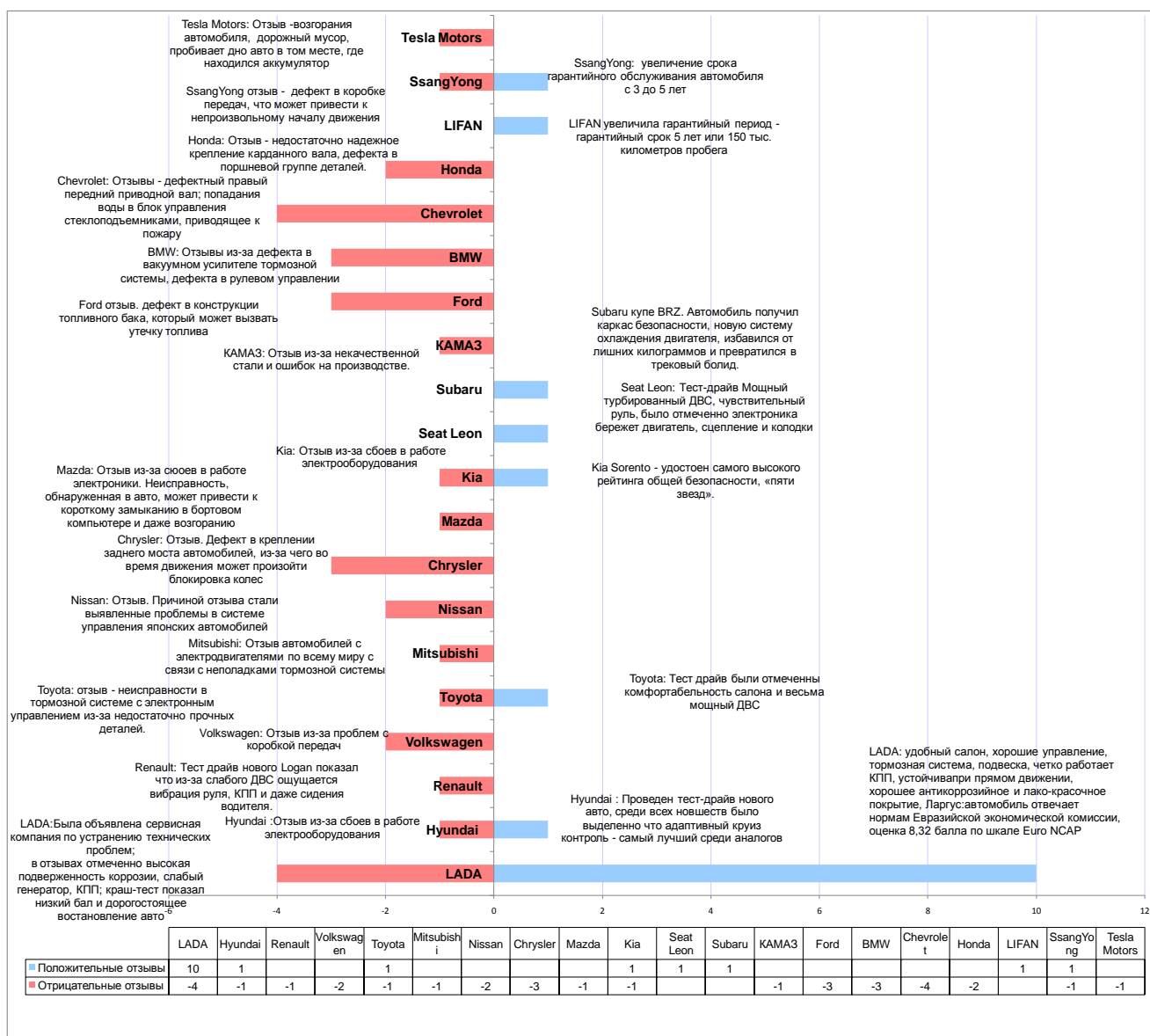


Рисунок 6.4 - Информационно-аналитическая карта СМИ по вопросам качества автомобилей

Анализ данных представленных на рисунке 6.4 показывает, что практически все сообщения, отрицательно влияющие удовлетворенность потребителей касаются отзывных компаний. В течении 2013г. Практически все мировые лидеры провели индивидуальный отзыв АТС. Большая часть отзывных компаний так или иначе связана с отклонениями в работе электронных и электротехнических комплексов автомобилей.

Проблема организации индивидуального отзыва ЭМБ и АКЭУ из эксплуатации при выявлении в их конструкции критических дефектов не является новой.

Исследование отзывных компаний показывает, что автопроизводители могут решать две основные задачи при реализации соответствующего процесса:

1 реклама, обеспечивающая положительное восприятие потребителем информации об отзыве, как заботу автопроизводителя о своей продукции;

2 устранение несоответствий, как инструмент поддержания надежности продукции на послепроизводственном этапе жизненного цикла.

ЭМБ и АКЭУ - это сложный высокотехнологичный продукт состоящий из десятков комплексов и систем. Во многих случаях спрогнозировать причину и последствие сбоя в работе АТС в период эксплуатации непросто. Корпорации используют системы накопления знаний от проекта к проекту автомобилей для недопущения просчетов в новых конструкциях. Однако, этого не всегда достаточно. На сегодняшний день, по прежнему, именно данные поступающие из эксплуатации позволяют наиболее полно оценить риски возникновения отказов. И здесь, одним из наиболее ярких примеров последних лет является отзывная компания автомобилей фирмы Toyota. В таблице 6.24 представлена хронология отзывов автомобилей данной марки в течении 2009 – 2010 гг. В рассматриваемый период времени у компании был целый ряд отзывов автомобилей из эксплуатации среди которых наиболее важным стал отзыв по причине возможного неконтролируемого ускорения автомобилей в движении. Изучением причин данного несоответствия в течении длительного времени занимались эксперты Toyota, а затем и специалисты NTHSA (Американский департамент дорожной безопасности) и NASA (Национальное аэрокосмическое агентство США). За время разбирательств по всему миру были объявлены отзывы нескольких миллионов автомобилей. Президент компании Toyota неоднократно приносил свои извинения потребителям, обещая не допускать в дальнейшем подобных несоответствий. Фирма несла финансовые и имидживые потери. Однако результаты разбирательств показали ключевое влияние человеческого фактора в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) произошедших в эксплуатации с автомобилями данной марки. Иными словами, эксперты сошлись во мнении, что причинами (ДТП) не являлся отказ техники. Это говорит о том, что, несмотря на наличие прогрессивных технологий в

проектировании и производстве продукции, в настоящее время отсутствует аппарат прогнозирования причинно-следственной связи отказов ЭМБ и АКЭУ в период эксплуатации [155, 158].

Таблица 6.24 – Хронология отзывных компаний компании Toyota в 2009-2010 гг.

№ п/п	Дата публик. информ.	Модели автом.	Причина отзыва	Колич. отзыв. автом., шт.	Источн. информ
1	2	3	4	5	6
1	09.07.09	Corolla и Yaris	Причиной отзыва являются обнаруженные дефекты коробки передач и сцепления	71 тыс.	Doroga63.ru, Самара
2	21.10.09	-	У автомобилей застревала педаль газа, и в результате, когда водитель отпускал ее, скорость машины продолжала увеличиваться.	3,8 млн.	AutoNews, Москва
3	26.11.09	Пикапы Tundra	Причина отзыва кроется в недостаточной коррозионной стойкости деталей этих автомобилей. Были зафиксированы случаи, когда коррозия разъедала крепления, удерживающие запасное колесо под днищем пикапа, и оно падало на дорогу, создавая опасность для других участников движения. Существует также вероятность, что ржавчиной повреждены тормозные контуры, что гораздо опаснее и может привести к серьезным ДТП из-за отказа тормозов.	110 тыс.	AutoNews, Москва
4.	02.12.09	-	Toyota выдвинула версию – о том, что причиной как минимум 19 смертей в ДТП на территории США была педаль газа неправильной формы. Теперь же газета выдвинула версию, что причина неконтролируемого ускорения машины кроется в электронном регуляторе подачи топлива, изначально спроектированном неправильно.	3,8 млн.	AutoNews, Москва/
5.	08.12.09	Corolla и Martix	Американский департамент дорожной безопасности NHTSA начал расследование жалоб владельцев автомобилей Toyota на то, что машины неожиданно глохли во время движения.	397 тыс.	Газета.ru, Москва
6.	26.12.09	Lexus ES 350, Lexus RX 350, Highlander, Previa	Toyota отзывает автомобили изготовленные в Китае из-за неисправности, которая может повлечь за собой разлив моторного масла.	43 тыс.	Новые известия
7.	25.01.10	Aygo, iQ, Yaris, Auris, Corolla, Verso, Avensis и RAV4	Toyota Motor может начать отзыв с европейских рынков автомобилей с дефектом педали газа, спровоцировавшим ранее масштабные отзывы в США.	1,8 млн.	AutoNews, Москва
8.	04.02.10	-	Проблема с педалью акселератора, приведшая к масштабным отзывам автомобилей Toyota во всем мире, может проявиться у автомобилей эксплуатируемых на территории России.	160 тыс.	AutoNews, Москва

Организация процесса по индивидуальному отзыву перспективных АТС, к числу которых относятся ЭМБ и АКЭУ позволяет провести полноценный анализ возможных несоответствий, а также реализовать мероприятия по поддержанию надежности продукции.

Нами предложен алгоритм реализации и классификатор отзывных компаний (особых технических операций (ОТО)), которые представлены на рисунках 6.5, 6.6 [158, 159].

Решение об организации индивидуального отзыва автомобилей должно приниматься высшим руководством предприятия на основе полных и достоверных данных о причинах и последствиях несоответствия. При принятии решения необходимо обладать данными о количестве отзываемых автомобилей и возможных затратах на устранение несоответствия.

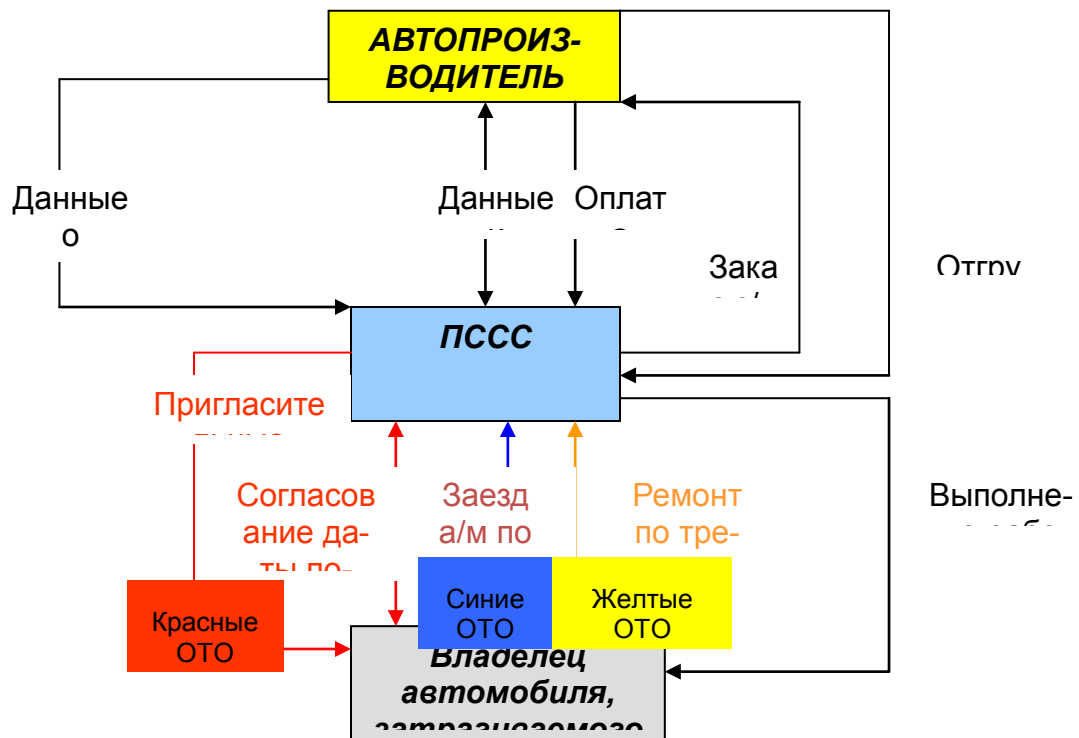


Рисунок 6.5 – Алгоритм организации индивидуального отзыва автомобилей

- **Красные ОТО:** Первоочередные операции, требующие немедленных действий в отношении автомобилей, которых данные ОТО касаются, независимо от того, находятся ли автомобили на гарантийном обслуживании или нет. Операция предполагает обязательный отзыв указанных автомобилей.
- **Синие ОТО:** Предусматривают принятие профилактических мер по потенциальным несоответствиям, не затрагивающим безопасность автомобилей. Эти операции проводятся при первом посещении владельца

Рисунок 6.6 – Классификатор отзывных компаний

На основе данных, которые формируются в процессе реализации процедуры отзыва автомобилей (причины и ответственные, информация об исполнении процедуры) разрабатывается программа анализа полученных уроков. В программе автопроизводитель проводит доскональный анализ всех возможных причин несоответствий повлекших за собой отзывную компанию, исследует ее последствия для продукции, для имиджа и экономики предприятия. Для этого определяется центр ответственности за произошедший сбой в работе предприятия, приведший к необходимости организации отзыва автомобилей. В рамках выявленного центра ответственности внедряются разработанный план действия, который снижает риски возникновения подобных ситуаций в будущем.

Таким образом, реализация алгоритма и классификатора процесса индивидуального отзыва автомобилей, на наш взгляд, представляет собой крайнюю меру в решении проблемы снижения риска недостаточной надежности ЭМБ и АКЭУ.

Использование инструментов организации индивидуального отзыва ЭМБ и АКЭУ, на наш взгляд, представляет собой крайнюю меру в решении проблемы снижения риска недостаточной надежности продукции автомобилестроения.

Методика расчета снижения затрат по сложным рекламациям по результатам внедрения мероприятий по улучшению надежности ЭМБ и АКЭУ [155]. В ка-

честве источника информации по сложным рекламациям может выступать специализированная информационная система связывающая предприятия дилерской сети и автопроизводителя. В рамках системы дилер должен оперативно направлять информацию о кризисных ситуациях связанных с обнаружением соответствующих отказов.

Для реализации методики требуются следующие количественные показатели:

T_v – дата (месяц) внедрения мероприятий по улучшению надежности;

M_1 – база (множество) номеров ЭМБ и АКЭУ, на которые поступили сложные рекламации за 6 месяцев до внедрения мероприятий;

K_1 – количество всех отказов, имеющихся в базе данных по гарантии на автомобили множества M_1 ;

$Z_{OCP}(M_1)$ – общие затраты на множество ЭМБ и АКЭУ M_1 из базы данных сложных рекламаций;

$K_1(K_{код.отк.})$ – общее количество отказов с кодом отказов $K_{код.отк.}$ имеющихся в базе данных по гарантии на автомобили из множества M_1 ;

M_2 – множество номеров ЭМБ и АКЭУ, на которые поступили сложные рекламации за 6 месяцев после внедрения мероприятий по улучшению надежности;

K_2 – количество всех отказов имеющихся в базе данных по гарантии на автомобили множества M_2 ;

$Z_{OCP}(M_2)$ – общие затраты на множество ЭМБ и АКЭУ M_2 из базы сложных рекламаций.

Алгоритм расчета. Расчет характеристик отказа до внедрения мероприятий по улучшению надежности.

1 Расчет величины затрат по сложным рекламациям, приходящаяся на коды отказов $K_{код.отк.}$ до внедрения мероприятий

$$Z_{OCP}(K_1(K_{код.отк.})) = \frac{Z_{OCP}(M_1)}{K_1} \times K_1(K_{код.отк.}). \quad (6.35)$$

Расчет характеристик отказа после внедрения мероприятий по улучшению надежности ЭМБ и АКЭУ.

2 Расчет величины затрат по сложным рекламациям, приходящаяся на отказы с кодом Ккод.отк. после внедрения мероприятий.

$$Z_{OCP}(K2(K_{\text{код.отк.}})) = \frac{Z_{OCP}(M2)}{K2} \times K2(K_{\text{код.отк.}}). \quad (6.36)$$

3 Расчет изменения затрат

$$\Delta Z_{OCP} = Z_{OCP}(K1(K_{\text{код.отк.}})) - Z_{OCP}(K2(K_{\text{код.отк.}})). \quad (6.37)$$

6.6 Комплексное прогнозирование показателей ремонтпригодности ЭМБ и АКЭУ

Для формирования бюджета на гарантию новых ЭМБ и АКЭУ необходимо рассчитать среднюю стоимость устранения отказов автомобиля на весь срок гарантии [144].

Средняя стоимость устранения отказов автомобиля на весь срок гарантии рассчитывается по формуле

$$\bar{z}_{cp} = Z_n / V, \quad (6.38)$$

где \bar{z}_{cp} – средняя стоимость устранения отказов автомобиля на весь срок гарантии, руб.;

Z_n – полная сумма затрат на устранение отказов в автомобилях, выпущенных за отчетный месяц, руб.;

V – количество выпущенных ЭМБ и АКЭУ за отчетный месяц, шт.

С момента выпуска автомобиля и до момента окончания предъявления затрат проходит длительный период (период наблюдения):

- для 2-х годичной гарантии – до 36 месяцев (рисунок 6.7);
- для 3-х годичной гарантии – до 42 месяцев.

В связи с чем, на момент проведения расчета полная информация о затратах в гарантии имеется по автомобилям, выпущенным более 36 месяцев назад.

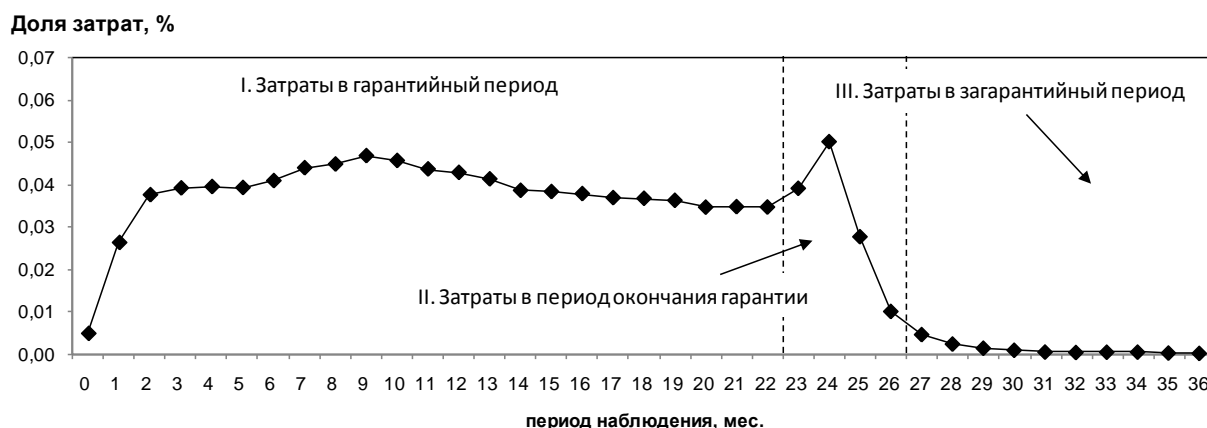


Рисунок 6.7 – Изменение долей затрат на устранение отказов в гарантийный период эксплуатации автомобилей

На момент проведения расчета для ЭМБ и АКЭУ, имеющих незавершенный период наблюдения каждому месяцу выпуска соответствует свой максимальный период наблюдения.

Полная сумма затрат на устранение отказов этих ЭМБ и АКЭУ состоит из двух частей: фактические затраты и сумма остатка.

Полная сумма затрат рассчитывается по формуле

$$Z_n = \sum_{i=1}^m Z_{\phi}^i + \sum_{i=1}^m Z_o^i, \quad (6.39)$$

где Z_{ϕ}^i – фактические затраты i -го месяца выпуска, руб.;

Z_o^i – сумма остатка (прогнозируемая) i -го месяца выпуска, руб.

Фактические затраты – это затраты фактически предъявленные автопроизводителю на момент проведения расчета. Они рассчитываются по формуле

$$Z_{\phi}^i = \sum_{j=0}^n z_{j,i}^i, \quad (6.40)$$

где $z_{j,i}^i$ – фактические затраты i -го месяца выпуска в j -м периоде наблюдения, руб.

Сумма остатка – это затраты, которые будут предъявлены автопроизводителю в будущем, до окончания гарантии. Следовательно, на выпусках с незавершенной гарантией приводим по оставшейся доле затрат в соответствии с распределением затрат на автомобилях с завершенной гарантией.

Сумма остатка (прогнозируемая) рассчитывается по формуле

$$Z_o^i = Z_\Phi^i \times d_o^i, \quad (6.41)$$

где d_o^i – суммарная доля остатка i -го месяца выпуска, %.

Суммарная доля остатка рассчитывается по формуле

$$d_o^i = \sum_{j=0}^n d_j^b, \quad (6.42)$$

где d_j^b – доля средних затрат базового периода выпуска в j -м периоде наблюдения, %.

Доля средних затрат базового периода выпуска рассчитывается по формуле

$$d_j^b = z_j^b / \sum_{j=1}^m z_j^b, \quad (6.43)$$

где z_j^b – средние затраты базового периода выпуска в j -м периоде наблюдения, руб.

Средние затраты базового периода выпуска рассчитывается по формуле

$$z_j^b = \sum_{i=1}^{12} z_i^b / 12, \quad (6.44)$$

где z_i^b – затраты базового периода выпуска в i -м месяце выпуска, руб.

Прогноз затрат, приходящихся на 3-й год гарантии, наступающего в период с 23 по 36 месяц выполняется по линейному тренду на основе данных о затратах за период с 12 по 22 месяц наблюдения (рисунок 6.8). Распределение затрат (доли затрат) в момент окончанием гарантии (период наблюдения с 23 по 30 месяц) сдвигают на 12 месяцев назад.

В общем виде таблица расчета суммы гарантийных затрат представлена на рисунке 6.9.

Полная сумма затрат в ближайших к расчетному месяцу выпусках (6 месяцев) приводится по среднему значению результатов за предыдущие месяцы выпуска (30 месяцев).

6.7 Выводы по главе

Основным выводом шестой главы настоящей работы является, то что развитие методов оценки эффективности, прогнозирования и планирования затрат на устранение отказов новых ЭМБ и АКЭУ в период эксплуатации должно базироваться на комплексном подходе. Фундаментом реализации идеи комплексного подхода является развитие набора постоянно действующих и актуализирующихся источников информации отражающих данные о качестве, надежности и удовлетворенности потребителей эксплуатируемыми автомобилями, а также развитие методов исследования информации.

Сегодня, для обеспечения процессов прогнозирования эффективности эксплуатации ЭМБ и АКЭУ с учетом уровня удовлетворенности потребителей уже не достаточно использовать только инструментарий методов исследования надежности и ремонтпригодности. Важнейшими инструментами для специалистов занимающихся исследованием качества продукции становятся аналитические инструменты технического маркетинга.

Только комплексный анализ информации о надежности и текущих затратах на устранение отказов в автомобилях, с учетом изменяющейся при этом оценки удовлетворенности, способен открыть для автопроизводителя горизонты перспектив развития потребительских свойств выпускаемой продукции. Важным элементом общей стратегии развития качества ЭМБ и АКЭУ при этом становится накопленный опыт, реализованный в виде прецедентных моделей – общедоступных виртуальных инструментов конструктора, технолога, производственника и конечно специалистов области качества.

Таким образом, разработанные методы, методики, компьютерные модели оценки эффективности, прогнозирования и планирования показателей ремонтпригодности применимы для реализации проектов развития ЭМБ и АКЭУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При решении задачи создания системы научно-практических инструментов и средств, направленных на повышение эксплуатационной эффективности ЭМБ и АКЭУ получены следующие научные и практические результаты.

1. Разработаны, в рамках единого комплекса, уравнения движения, тягового, мощностного и энергетического балансов фаз циклического движения ЭМБ и АКЭУ в городском режиме, что обеспечивает возможность для повышения эффективности процессов проектирования транспортных средств на электрических технологиях исходя из требований роста эксплуатационных характеристик.

2. Разработана математическая модель бортового электросилового накопителя энергии для ЭМБ и АКЭУ. Модель адекватна для свинцовых, литий-ионных и никель-металл-гидридных тяговых аккумуляторных батарей и может быть использована при определении массогабаритных показателей как транспортного средства в целом, так и для выбора тяговой аккумуляторной батареи и силового электрооборудования. Относительная погрешность аппроксимации по модели не превышает 1,14 %.

3. Решены задачи по математическому моделированию и обеспечению управления электрическими машинами в тяговых приводах ЭМБ и АКЭУ, а также их предельного использования по мощности во всем диапазоне возможных скоростей и нагрузок с минимально возможным для каждого режима работы потерями, с учетом ограничений, налагаемых на максимальные значения фазного напряжения и тока, а также мощности, потребляемой от источника энергии.

4. Разработан комплекс имитационных моделей электронных систем управления движением автомобилей на электрических технологиях: системы регулирования скорости движения; системы изменения фаз газораспределения (VVT); системы управления «Старт – Стоп». Комплекс обеспечивает повышение эффективности в проектировании АКЭУ, за счет виртуализации сложных алгоритмов работы ДВС, а также позволяет в автоматизированном режиме формировать матема-

тические программы управления, реализуемые в контроллере электронной системы управления двигателем (ЭСУД) автомобиля.

5. Предложен новый критерий, отражающий уровень удовлетворенности потребителей качеством и надежностью ЭМБ и АКЭУ в эксплуатации ($E\%$) через систему количественно-качественной оценки и обеспечивающий гармоничное развитие аналитического комплекса мониторинга и прогнозирования данных поступающих из эксплуатации.

6. Разработан аналитический метод перекрестного анализа информации о качестве ЭМБ и АКЭУ в эксплуатации, позволяющий формировать наиболее полный перечень проблем надежности автомобилей, исходя из сопоставления и определения весомости данных об отказах, которые поступают по корпоративным каналам связи автопроизводителя и уровне воспринимаемого качества, через реализацию анкетных комплексов области технического маркетинга.

7. Вскрыта группа перспективных количественных показателей, которая в совокупности с критерием $E\%$, интегрирует базу концепции повышения эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ, формируя наилучший результат в реализации модели перекрестного анализа данных о надежности и удовлетворенности. Применение концепции обеспечения качества и надежности ЭМБ и АКЭУ существенно расширяет спектр аналитических инструментов качества и создает предпосылки для повышения полноты анализа данных о надежности автомобилей в эксплуатации, а также улучшает оперативность решения конструкторских, технологических и производственных проблем в области качества и надежности.

8. Разработан метод прогнозирования показателей ремонтпригодности новых проектов ЭМБ и АКЭУ, через введение показателя средней стоимости устранения отказов автомобилей на весь период гарантийной эксплуатации. Применение метода обеспечивает повышение эффективности процесса формирования бюджета на гарантию ЭМБ и АКЭУ за счет разделения показателя средней стоимости на фактические и прогнозные затраты по группам автомобилей с завершённой гарантией.

9. Разработана система математических моделей и программ, реализующих аналитическую оценку и прогнозирование эксплуатационных характеристик ЭМБ и АКЭУ с использованием данных о надежности и ремонтпригодности. Применение моделей и программ в практике предприятий автомобильной промышленности обеспечивает повышение эффективности процессов прогнозирования и управления надежностью автомобилей на электрических технологиях в эксплуатационный период жизненного цикла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 АвтоВести [Электронный ресурс] : «АВТОВАЗ тестирует электрокары, но массово выпускать их не собирается». URL : <http://auto.vesti.ru/> (дата обращения: 15.09.2011).
- 2 Андерс, В. И. Определение мощности элементов электрооборудования транспортных машин с электроприводом / В. И. Андерс // Тр. МЭИ. – М. : – 1977. – Вып.308.
- 3 Анисимов, В. М., Системы и статистические методы обеспечения качества промышленной продукции : учебное пособие / В. М. Анисимов, В. А. Николаев. – Самара, 2000. – 232 с.
- 4 Анисимов, В. М. Автомобильные стартеры и генераторы. Состояние и перспективы развития / В. М. Анисимов, А. И. Скороспешкин, П. Ю. Грачев, В. Р. Тарановский, В. Н. Кудояров // Автомобильная промышленность. – 1995. – №11. – С. 9 – 15.
- 5 Арсентьев, О. В. Функциональное моделирование электрооборудования АТС. Комплекс программ / О. В. Арсентьев, К. Э. Буренков, А. Е. Чернов // Автомобильная промышленность. – 1993. – №6. – С. 33.
- 6 Арустамов, Л. Х. ЭВМ – инструмент разработчика изделий АТЭ / Л. Х. Арустамов, И. М. Шендеровский // Автомобильная промышленность. – 1996. – №9. – С. 34 – 38.
- 7 Балагуров, В. А. Аппараты зажигания / В. А. Балагуров. – М., 1968. – 252 с.
- 8 Балагуров, В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока / В. А. Балагуров. – М., 1982. – 272 с.
- 9 Банников, С. П. Электрооборудование автомобилей / С. П. Банников – М., 1970. – 288 с.
- 10 Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М., 1978. – 240 с.

- 11 Братухин, А. Г. Высокоэффективные конструкционные и функциональные материалы – основа качества и надежности современной техники / А. Г. Братухин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2000. – №8. – С. 21 – 27.
- 12 Ван-дер-Варден Математическая статистика / Ван-дер-Варден. – М., 1960. – 434 с.
- 13 Версан, В. Г. Интеграция производства и управления качеством продукции / В. Г. Версан и др. – М., 1995.
- 14 Версан, В. Г. Управление качеством на новом витке / В. Г. Версан // Стандарты и качество. – 2000. – №7. – С. 44 – 48.
- 15 Верченко, В. Р. К вопросу о численном определении уровня качества изделия / В. Р. Верченко, Б. Н. Волков // Стандарты и качество. – 1970. – №3. – С. 18 – 21.
- 16 ВЕСТИ.РУ [Электронный ресурс] : «Ё-мобиль» получит уникальный электромотор». URL : <http://www.vesti.ru/> (дата обращения: 03.07.2011).
- 17 Виноградов, А. Б. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом / А. Б. Виноградов, В. Д. Чистосердов, А. Н. Сибирцев // Электротехника. – 2003. – № 7.
- 18 Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М., 1967. – 368 с.
- 19 Годлевский, В. Е. Система менеджмента качества на основе ИСО/ТУ 16949-2002. / В. Е. Годлевский, Е. А. Вакулич, А. Я. Дмитриев, А. В. Литвинов, К. М. Файн, Е. А. Шабанова. – Самара : ГП «Перспектива», 2002. – 288 с.
- 20 Годлевский, В. Е. Система менеджмента качества : учебное пособие / В. Е. Годлевский, Г. Н. Изюменко, О. М. Карпилова, В. Я. Кокотов. – Самара : Самарский научный центр РАН, 2001. – 132 с.
- 21 Годлевский, В. Е. Применение статистических методов в автомобилестроении / В. Е. Годлевский, А. Н. Плотников, Г. Л. Юнак; под ред. А. В. Васильчука. – Самара : ГП «Перспектива», 2003. – 196 с.

- 22 Годлевский, В. Е. Менеджмент качества в автомобилестроении : монография / В. Е. Годлевский, Г. Л. Юнак; под ред. А. В. Васильчука. – Самара : ООО «Офорт»; ЗАО «Академический инжиниринговый центр», 2005. – 628 с.
- 23 Гольдберг, О. Д. Качество и надежность асинхронных двигателей / О. Д. Гольдберг. – М., 1978. – 176 с.
- 24 ГОСТ Р 53480–2009. Надёжность в технике. Термины и определения. – Введ. 2009–12–09. – М. : Изд-во стандартов, Стандартинформ, 2010. – 27 с.
- 25 ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1979–07–01. – М. : Государственным комитетом СССР, 1979. – 34 с.
- 26 ГОСТ 16431 – 70. Качество продукции.
- 27 ГОСТ 16431 – 70. Качество продукции. Показатели качества и методы оценки уровня качества продукции. Термины и определения.
- 28 ГОСТ Р ИСО/ТУ 16949 – 2009 Системы менеджмента качества. Особые требования по применению ИСО 9001:2008 в автомобильной промышленности и организациях, производящих соответствующие запасные части.
- 29 ГОСТ Р ИСО 9001-2008. Система менеджмента качества. Требования. – Введ. 2008–12–18. – М. : Изд-во стандартов, Стандартинформ, 2009. – 31 с.
- 30 Гулятьев, А. К. Имитационное моделирование в среде Windows / А. К. Гулятьев. – СПб., 1999. – 288с.
- 31 Гурьянов, Д. И. Имитационная модель зарядного баланса автомобильного электрооборудования / Д. И. Гурьянов, В. Н. Козловский, А. Д. Немцев // Автотракторное электрооборудование. – 2002 – № 5-6. – С. 17-19.
- 32 Диланян, Э. М. Определение оптимальных весовых соотношений в электромобиле / Э. М. Диланян, С. Г. Корюгян, А. А. Момджян, Ю. В. Агабабян // Электротехника. Сер. XII–Ереван – 1974. – Вып.1.
- 33 Доржинкевич, И. Б. Особенности проектирования электрооборудования электромобиля / И. Б. Доржинкевич // Электротехника. – 1981. – № 10.

- 34 Дружинин, В. В. Магнитные свойства электротехнической стали / В. В. Дружинин. – М., 1974. – 240 с.
- 35 Дьяконов, В. Matlab. Анализ идентификация и моделирование систем / В. Дьяконов, В. Круглов. – СПб., 2002. – 448 с.
- 36 Дьяконов, В. П. Matlab система символьной математики / В. П. Дьяконов, И. В. Абраменкова. – М., 1999. – 640 с.
- 37 Ермолин, Н. П. Надёжность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихов – Л. : Энергия, 1976. – 248 с.
- 38 Ефремов, И. С. Системная оптимизация энергетических характеристик тягового привода электромобиля / И. С. Ефремов, Д. И. Гурьянов, С. Д. Усов // Тез. докл. всесоюз. научно-техн. конф. : Состояние и перспективы развития электрические технологии (Вторые Бенардосовские чтения). – Иваново : МЭИ, 1985.
- 39 Жуков, Н. А. Управление качеством при изготовлении асинхронных двигателей / Н. А. Жуков, В. М. Игнатович, О. П. Муравлев // Надёжность и контроль качества. – 1977. – №3. – С3 – 6.
- 40 Заятров, А. В. Анализ оперативных методов обеспечения надёжности для системы электрооборудования автомобилей [Текст] / А. В. Заятров, В. Н. Козловский // Грузовик. – 2013. – №4. – С. 18–20.
- 41 Иванов, В. С. Контроль качества продукции в машиностроении / В. С. Иванов, А. Н. Зуев. – М., 1990. – 97 с.
- 42 Исследование возможности повышения уровня напряжения бортсети автомобилей ВАЗ : отчет по НИР (заключительный). // ТолПИ, ОАО «АВТО-ВАЗ» № 303946. – Тольятти, 1990. – 123 с.
- 43 Исследование удовлетворенности потребителей по результатам 1 года эксплуатации автомобиля. Центр исследования рынка в Бухаресте – D.C.C. SASCM/L.DUPONT – 2008. – 20 с.
- 44 Дилалян, Э. М. К выбору параметров оборудования аккумуляторных электромобилей / Э. М. Дилалян, В. С. Варпетян, А. А. Момджян, А. П. Тарасян // межвуз. сб. научн. тр. сер. XIII, Электротехника. – Ереван, 1979.

- 45 Казаков, А. И. Автоматизированное проектирование электрооборудования и его элементов / А. И. Казаков, Н. П. Любченко // Автомобильная промышленность. – 1993. – №8. – С. 25 – 27.
- 46 Калабро, С. Р. Принципы и практические вопросы надёжности : пер. с англ. под науч. ред. Панова Д. Ю. – М. : Машиностроение, 1966. – 376 с.
- 47 Каменнова, М. «Моделирование бизнеса. Методология ARIS. Практическое руководство» / М. Каменнова, А. Громов, М. Ферапонтов, А. Шматалюк. – М., 2001. – 327 с.
- 48 Качество и конкурентоспособность : теория, методология, практика. М., 1987. – 50 с.
- 49 Коварский, Е. М. Испытание электрических машин / Е. М. Коварский, Ю. И. Янко. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
- 50 Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
- 51 Ковригин, А. С. Автомобилестроение России на пороге 21 века / А. С. Ковригин // Автомобильная промышленность. – 2001. – №3. – С. 1 – 5.
- 52 Козловский, В. Н. Моделирование электрооборудования автомобилей в процессах проектирования и производства : монография. / В. Н. Козловский. – Тольятти : ТГУ, 2009 – 227 с.
- 53 Козловский, В. Н. Обеспечение качества и надёжности электрооборудования автомобилей : монография. / В.Н. Козловский. – Тольятти : ТГУ, 2009. – 274 с.
- 54 Козловский, В. Н. Обоснование проблемы обеспечения качества стартер-генераторных установок на стадии проектирования / В. Н. Козловский, С. А. Феофанов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2008. – №5. – С. 39 – 41.
- 55 Козловский, В. Н. Имитационное моделирование в управлении качеством типовых конструкций электромеханического усилителя рулевого управления / В. Н. Козловский, В. Е. Ютт // Электроника и электро-оборудование транспорта. – 2008. – №2. С. 18 – 22.

56 Козловский, В. Н. Надежность системы электрооборудования современного автомобиля / В. Н. Козловский, В. Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2008. – №3. С. 37 – 40.

57 Козловский, В. Н. Комплексы количественных показателей, применяемые при организации мониторинга качества легковых автомобилей в эксплуатации / В. Н. Козловский, В. И. Строганов // Автомобильная промышленность. 2013. – №4. С. 4 – 8.

58 Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин / И. П. Копылов. – М., 1987. – 248 с.

59 Копылов, И. П. Математическое моделирование асинхронных машин / И. П. Копылов, Ф. А. Мамедов, В. Я. Беспалов. – М., 1969. – 96 с.

60 Купеев, Ю. А. Основные задачи развития автомобильной электроники и электрооборудования на период 2001-2005 гг. и до 2010 г. / Ю. А. Купеев // Автотракторное электрооборудование. – 2001. – №3-4. – С. 7 – 9.

61 Курочкин, А. Г. Проблемы обеспечения качества проектирования современных электрических машин / А. Г. Курочкин // Автотракторное электрооборудование. – 2002. – №1. – С. 24 – 28.

62 Кутенев, В. Ф. Технико экономические проблемы стратегии развития российского автомобилестроения / В. Ф. Кутенев, О. И. Гируцкий, Ю. А. Корольков, А. А. Ипатов // Автомобильная промышленность. – 1997. – №1. – С.1; №2. – С.2 – 5.

63 Лapidус, В. А. Звезды качества / В. А. Лapidус // Стандарты и качество. – 1997. – №7. – С. 47 - 51.

64 Лapidус, В. А. Перспективы стандартизации и методического обеспечения управления качеством продукции / В. А. Лapidус // Стандарты и качество. – 1991. – №1. – С. 23 – 27.

65 Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

66 Лидоренко, Н. С. Электрохимические генераторы / Н. С. Лидоренко, Г. Ф. Мучник. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 448 с.

- 67 Литвиненко, В. В. Электрооборудование автомобилей ВАЗ / В. В. Литвиненко. – М., 1995. – 240 с.
- 68 Маркетинговый отчет. Автопром в России итоги и перспективы. Аналитическое агентство Автостат, г. Тольятти, 2008. – 44 с.
- 69 Марсов, В. М. Тенденции развития электропусковой системы и системы электроснабжения в автомобилях / В. М. Марсов, А. И. Фещенко, С. А. Феофанов // сборник научных трудов «Новые технологии в автоматизации управления». МАДИ(ГТУ). – М, 2007. – С. 168 – 194.
- 70 Масич, В. Н. Сертификация и надежность генераторов / В. Н. Масич. // Автомобильная промышленность. – 1997. – №1. – С. 26 – 29.
- 71 Маслов, Д. В. От качества к совершенству. Полезная модель EFQM./ Д. В. Маслов. – М. : РИА «Стандарты и качество», 2008. – 152 с.
- 72 Машихлин, А. Д. Особенности решения задач тяговых расчетов автосамосвалов с электрическим приводом / А. Д. Машихлин, А. З. Мансурова // ЭТП. сер. Тяговое и подъемно-трансп. электрооборуд. – 1975. – Вып. 4(37).
- 73 Методические материалы для подготовки системы менеджмента качества к сертификации на соответствие ISO/TS 16949:2002. Самара, 2003. – 108 с.
- 74 Методические рекомендации по определению факторов конкурентоспособности продукции отрасли. НИИМАШ-М., 1986.
- 75 Методология функционального моделирования IDEF0. Руководящий документ. Госстандарт России. Москва, 2000. – 62 с.
- 76 Митропольский, А. К. Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. – М., 1972. – 576 с.
- 77 Мишина, А. П. Высшая алгебра / А. П. Мишина, И. В. Проскуряков. – М., 1965. – 301с.
- 78 Морозов, А. Г. Расчет электрических машин постоянного тока / А. Г. Морозов. – М., 1977. – 264 с.
- 79 Муравлев, О. П. Системный подход к оценке качества при проектировании и изготовлении электрических машин / О. П. Муравлев // Надежность и контроль качества. – 1983. – №10. – С. 30 – 35.

- 80 Муравлев, О. П. Применение статистических методов контроля качества при изготовлении асинхронных двигателей / О. П. Муравлев, А. Д. Немцев // Изв. Томск. политехн. ин-та. – 1972. – Т. 229. – С. 116 – 120.
- 81 Мюллер, К. Некоторые аспекты внедрения систем качества в промышленности / К. Мюллер // Стандарты и качество. – 1998. – №3. – С. 58 – 63.
- 82 Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М., 1965. – 340 с.
- 83 Немцев, А. Д. Стратегия формирования конкурентоспособности машиностроительной продукции / А. Д. Немцев. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2001. – 100 с.
- 84 Немцев, А. Д. Моделирование – инструмент управления качеством продукции / А. Д. Немцев, В. Н. Козловский // Автомобильная промышленность. – 2003. – №10. – С. 1 – 5.
- 85 Немый, С. В. Формирование надежности системы электроснабжения АТС / С. В. Немый // Автомобильная промышленность. – 1994. – №12. – С.25 – 28.
- 86 Николаев, В. В. Стартер-генератор автономных объектов на основе вентильно-индукторной машины : дисс. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Николаев Виталий Викторович. – М., 2005. – 142 с.
- 87 Никсон, Ф. Роль руководства предприятия в обеспечении качества и надежности продукции : пер. с англ. / Ф. Никсон. – М., 1990. – 231 с.
- 88 Оганесян, Р. М. Методические основы нормирования расхода электроэнергии для электромобилей / Р. М. Оганесян // межвуз. сбор. научн. тр. сер. XIII, Электротехника. – Ереван, 1979.
- 89 Огвоздин, В. Ю. Модель качества / В. Ю. Огвоздин // Стандарты и качество. – 1991. – №11. – С. 31 – 35.
- 90 Окшевский, Л. Л. Надежность автотракторного электрооборудования. Проблема, состояние, пути решения / Л. Л. Окшевский, А. К. Старостин // Автомобильная промышленность. – 1993 – №3.

- 91 Онученко, О. Г. Применение ЭВМ при решении задач аттестации качества электродвигателей / О. Г. Онученко, Ю. Д. Абакумов // Электротехническая промышленность. Серия эл. машины. – 1977. – вып. (5)(75). – С. 23 – 27.
- 92 Подсобляев, С. В. Стабильность технологий и материалов – важнейшее условие повышения качества АТС / С. В. Подсобляев, В. И. Гладков, В. М. Зинченко // Автомобильная промышленность. – 2000. – №1. – С. 1 – 5.
- 93 Пономарев, С. В. Управление качеством продукции. Инструменты и методы менеджмента качества : учебное пособие / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, В. Я. Белобрагин, В. А. Самордов, Б. И. Герасимов, А. В. Трофимов, С. А. Пахомова, О. С. Пономарева. – М. : РИА «Стандарты и качество», 2005. – 248 с.
- 94 Постников, И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин / И. М. Постников. – М., 1975. – 319 с.
- 95 Постников, И. М. Проектирование электрических машин / И. М. Постников. – Киев, 1960. – 910 с.
- 96 Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Проников. – М., 1978. – 592 с.
- 97 Разработка и исследование оптимальных автоматических приводов : отчет о НИР (заключ.) / Рук. М.А. Дубровин, отв. исп. Гурьянов Д.И. – Шифр темы 304625; № ГР 0187.0019116. – Тольятти : ТолПИ.
- 98 Расчет рабочих характеристик автомобильных и автобусных генераторов переменного тока. РТМ 37.003 – 061 – 70. НИИАвтоприборов. – М., 1970. – 67 с.
- 99 Ревин, А. А. Комплексное моделирование в цикле проектирования автомобилей и их систем / А. А. Ревин, В. Г. Дыгало // Автомобильная промышленность. – 2002. – №11. – С. 29 – 33.
- 100 Рейдер, Р. Бенчмаркинг как инструмент определения стратегии и повышения прибыли : пер. с англ. Раскина А.Л.; под науч. ред. Даниловой Т.В./ Р. Рейдер – М. : РИА «Стандарты и качество», 2007. – 248 с.

101 Рейтинг TUV надежности автомобилей б/у // Новые и подержанные легковые автомобили – продажа и покупка, отзывы тест – драйв, обзоры с характеристиками : [Электронный ресурс]. – 2007. – URL: <http://auto.ironhorse.ru/>

102 Рейтинг надежности легковых автомобилей за 2006 год [Электронный ресурс]. – 2006. – URL: <http://www.ural.ru/>.

103 Репин, В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В. В. Репин, В. Г. Елиферов. – М. : РИА «Стандарты и качество», 2008. – 408 с.

104 Румянцева, А. Л. Проектирование катушек зажигания с замкнутым магнитопроводом на персональном ЭВМ / А. Л. Румянцева, С. В. Акимов // Автотракторное электрооборудование. – 2001. – №9-10. – С. 20 – 25.

105 Сенькин, И. В. Аппроксимация характеристики холостого хода при моделировании автомобильных генераторов с помощью персональных ЭВМ / И. В. Сенькин, С. В. Акимов // Сборник научных трудов МАМИ «Электротехнические системы автотранспортных средств и их производств». – М., 1994. – С. 89 – 95.

106 Сергеев, П. С. Проектирование электрических машин / П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов, Ф. А. Горяинов. – М., 1969. – 632 с.

107 Синько, В. И. Конкуренция и принципы обеспечения конкурентоспособности промышленной продукции / В. И. Синько // Вестник машиностроения. – 1999. – №12. – С. 3 – 10.

108 Сипайлов, Г. А. Математическое моделирование электрических машин / Г. А. Сипайлов, А. В. Лоос. – М., 1980. – 176 с.

109 Система автоматизации проектных работ [Электронный ресурс]. – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 15.10.2013).

110 Сиськов, В. И. Экономико-статистическое исследование качества продукции / В. И. Сиськов. – М. : Статистика, 1971. – 256 с.

111 Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М., 1965. – 586 с.

112 Сорокин, А. И. Сравнительный анализ автомобильных двигателей внутреннего сгорания и энергоустановок на топливных элементах : II Всероссийский семинар «Топливные элементы и энергоустановки на их основе» / А. И. Сорокин, Г. К. Мирзоев // Новосибирск : 29 июня - 2 июля 2003 г.

113 Статистические методы повышения качества / под ред. Х. Куме. – М., 1990. – 340 с.

114 Строганов, В. И. Массогабаритные характеристики гибридных силовых установок автомобиля / Д. И. Гурьянов, В. И. Строганов // Объединенный научный журнал, 2003 – №10. – С. 67 – 71.

115 Строганов, В. И. Проблемы гибридного автобусостроения / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов // Автотракторное электрооборудование, 2004 – №8. – С. 30 – 33.

116 Строганов, В. И. «Ока – электро» с емкостным накопителем энергии : тезисы докл. междунар. научн. симп. «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки кадров» / В. И. Строганов, А. К. Макаров, А. Б. Петленко, С. А. Корчак. – М. : МГТУ «МАМИ», 2000. – С. 39-41.

117 Строганов, В. И. Автономные источники питания напольного внутризаводского электротранспорта / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов, С. А. Пионтовская, А. К. Романов // Наука-производству. 2001. – №7. – С. 29-32.

118 Строганов, В. И. Алгоритм реализации компаний по индивидуальному отзыву автомобилей при возникновении проблем надежности / В. И. Строганов, В. Н. Козловский // сборник статей 9 международной научной конференции «Синергетика природных, технических и социально-экономических систем». – Тольятти : ПВГУС, 2012 г. – С. 102 – 106.

119 Строганов, В. И. Алгоритм управления автоматической трансмиссией автомобиля / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов, В. И. Губа, А. Н. Прохоров // Машиностроитель. – 2002. – №8. – С. 27-30.

120 Строганов, В. И. Алгоритм управления автоматической трансмиссией легкового автомобиля / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов, В. И. Губа, А. Н. Прохоров // Машиностроитель. – 2003. – №1. С. 42-46.

121 Строганов, В. И. Алгоритм управления системой «двигатель – трансмиссия» / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов, В. Н. Луценко, В. И. Губа, А. Н. Прохоров // Материалы Всерос. научно-техн. конф. «Технический вуз - наука, образование и производство в регионе». – Часть 2. – Тольятти : 2001. – С. 275-276.

122 Строганов, В. И. Алгоритм управления ступенчатой автоматической трансмиссией / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов, В. Н. Луценко, В. И. Губа, А. Н. Прохоров // Материалы Всерос. научно-техн. конф. «Технический вуз - наука, образование и производство в регионе». – Часть 2. – Тольятти : 2001, – С. 272-275.

123 Строганов, В. И. Проблемы совместимости силовых агрегатов гибридных автомобилей / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов, В. Н. Луценко // М.: МГТУ «МАМИ». – 2002. – С. 152-154.

124 Строганов, В. И. Бортовые энергоустановки внутрицеховых транспортных средств / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов, С. А. Пионтковская, В. В. Бойко // Межвуз. сб. научн. тр. «Наука, техника, образование г. Тольятти и Волжского региона». – Тольятти : ТолПИ, 2001. – Вып. 4, часть 2. – С. 414-421.

125 Строганов, В. И. Взаимосвязь электропроводности пламени, средней скорости сгорания и концентрации несгоревших углеводородов в ОГ бензиновых двигателей / В. И. Строганов, П. В. Ивашин, А. Л. Шайкин, П. В. Коломиец // Сб. научн. трудов «Современные тенденции развития автомобилестроения в России» : в 5 т./26-28 мая 2004/ – Тольятти : ТолГУ, 2004. – Т.4. С.83 – 90.

126 Строганов, В. И. Выбор трансмиссии гибридного автомобиля / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов, В. И. Губа // Межвуз. сб. научн. тр. «Наука, техника, образование г. Тольятти и Волжского региона» – Тольятти : ТолПИ, 2001. – Вып. 4, часть 2. – С. 111-119.

127 Строганов, В. И. Гибридная силовая установка городского экобуса / В. И. Строганов // Объединенный научный журнал. – 2003. – №7. – С. 62-67.

128 Строганов, В. И. Гибридная силовая установка типа «СПЛИТ» / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов, В. И. Губа // Межвуз. сб. научн. тр. «Наука, техни-

ка, образование г. Тольятти и Волжского региона». – Тольятти : ТолПИ, 2001. – Вып. 4, часть 2. – С. 107-111.

129 Строганов, В. И. Двигатель внутреннего сгорания в составе гибридной силовой установки / В. И. Строганов, А. Л. Шайкин, Д. И. Гурьянов // Объединенный научный журнал. – 2003. – №7. – С. 56 – 59.

130 Строганов, В. И. Обзор методов количественной оценки показателей качества и надежности электрооборудования автомобилей / В. И. Строганов, Б.Н. Сидоров // Автоматизация и управление в технических системах. – 2013. – №1. – С. 116 – 121.

131 Строганов, В. И. Ионный ток в пламени и средняя скорость сгорания в заключительной фазе / В. И. Строганов, П. В. Ивашин, А. Л. Шайкин, Т. А. Прокопович, Н. А. Шайкина // Сб. научн. трудов «Современные тенденции развития автомобилестроения в России» : в 5 т./26-28 мая 2004/ – Тольятти : ТолГУ, 2004. – Т.4. С. 91 – 98.

132 Строганов, В. И. Итоги и перспективы развития электромобилей и автомобилей с гибридными силовыми установками / В. И. Строганов, В. Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2012. – №2. – С. 2 – 8.

133 Строганов, В. И. Комбинированная установка городского экобуса / В. И. Строганов, В. Е. Ютт // Сб. научн. трудов «Новые технологии в автоматизации управления». – М. : МАДИ, 2006.

134 Строганов, В. И. Комплексная оценка удовлетворенности потребителей качеством автомобилей / В. И. Строганов, В. Н. Козловский, С. И. Клейменов // Стандарты и качество. – 2013. – №5. – С. 92 – 94.

135 Строганов, В. И. Концепция обеспечения качества и надежности электромобилей и автомобилей с гибридной силовой установкой / В. И. Строганов, В. Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта – 2012. – №5 – 6 С. 49 – 55.

136 Строганов, В. И. Математическое моделирование аккумуляторов при разряде их токами от холостого хода до короткого замыкания / В. И. Строга-

нов, Нгуен Куанг Тхиеу, Д. И. Гурьянов // Наука-производству. – 2004. – №8. – С. 66 – 68.

137 Строганов, В. И. Методика построения параметрических характеристик ДВС / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов, А. В. Филиппков, В. Н. Луценко // Межвуз. сб. научн. тр. «Наука, техника, образование г. Тольятти и Волжского региона». – Тольятти : ТолПИ, 2001. – Вып. 4, часть 2. – С. 119-127.

138 Строганов, В. И. Модели аналитических исследований качества и надежности легковых автомобилей в эксплуатации / В. И. Строганов, В. Н. Козловский, С. И. Клейменов // Автомобильная промышленность. – 2013. – №9. – С. 1 – 6.

139 Строганов, В. И. Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства / В. И. Строганов, В. Н. Козловский. – М. :ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)». – 2014. – 264 с.

140 Строганов, В. И. Моделирование электронной системы регулирования скорости движения легкового автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости / В. И. Строганов, В. В. Дебелов, В. Н. Козловский, В. В. Иванов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – №6. – С.2-8.

141 Строганов, В. И. Модель ремонтпригодности как инструмент прогнозирования качества и надежности легковых автомобилей / В. И. Строганов, В. Н. Козловский, А. В. Зятров // Автомобильная промышленность. – 2013. – №11. – С. 19-21.

142 Строганов, В. И. Обеспечение качества и надежности электрооборудования автомобиля с комбинированной силовой установкой на этапах проектирования и производства / В. И. Строганов, В. Н. Козловский // Электротехнические и программные комплексы и системы. – Уфа, УГУЭС – №1. – 2013. С. 21 – 30.

143 Строганов, В. И. Оперативные показатели надежности электрооборудования автомобилей / А. В. Заятров, В. И. Строганов, В. Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – №1. – С. 43 – 45.

144 Строганов, В. И. Перспективные системы оценки эффективности мероприятий по улучшению качества и надежности электромобилей и автомобилей с гибридной силовой установкой / В. И. Строганов, В. Н. Козловский // Школа университетской науки: парадигма развития. – Тольятти : ПВГУС, 2012. – №3. С. 87 – 93.

145 Строганов, В. И. Построение многопараметровых характеристик двигателя автомобиля / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов, А. Л. Шайкин // Объединенный научный журнал. – 2003. – №9. – С. 53 – 57.

146 Строганов, В. И. Расчет энергетики гибридного автомобиля последовательно - параллельной архитектуры / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов, А. В. Филиппов, В. Н. Луценко // Межвуз. сб. научн. тр. «Наука, техника, образование г. Тольятти и Волжского региона». – Тольятти : ТолПИ, 2001. – Вып. 4, часть 2. – С. 98 – 107.

147 Строганов, В. И. Современные энергоустановки гибридных автомобилей / В. И. Строганов, Д. И. Гурьянов // Материалы междунар. научно-техн. конф. «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров». – М. : МГТУ «МАМИ», 2002.

148 Строганов, В. И. Сравнительная оценка трансмиссий гибридного автомобиля / Д. И. Гурьянов, В. И. Строганов // Автотракторное электрооборудование. – 2004. – №5.

149 Строганов, В. И. Трансмиссии гибридных автомобилей / В. И. Строганов // Объединенный научный журнал. – 2003. – №10. – С. 67 – 71.

150 Строганов, В. И. Удовлетворенность потребителя – инструмент повышения конкурентоспособности продукции отечественного автомобилестроения / В. И. Строганов, В. Н. Козловский // Автомобильная промышленность. – 2013. – №2. – С. 1 – 6.

151 Строганов, В. И. Электронная система регулирования скорости движения автомобиля в режимах поддержания и ограничения скорости / В. И. Строганов, В. В. Дебелов, В. В. Иванов, В. Е. Ютт, В. Н. Козловский // Грузовик – 2013. – №12. – С.19 – 24.

152 Строганов, В. И. Электропроводность пламени и скорость сгорания топливно-воздушной смеси в двигателе с искровым зажиганием / В. И. Строганов, С. И. Будаев, П. В. Ивашин, А. Л. Шайкин, В. В. Смоленский, А. В. Сурнов // Автотракторное электрооборудование. – 2004. – №3. – С. 42 – 44.

153 Строганов, В. И. Электропроводность пламени и средняя скорость сгорания в заключительной фазе / В. И. Строганов, П. В. Ивашин, А. Л. Шайкин, Т. А. Прокопович // Наука-производству. – 2004. – №4. – С. 5 – 6.

154 Строганов, В. И. Энергетика гибридного микроавтобуса / В. И. Строганов // Объединенный научный журнал. – 2003. – №9. – С. 48 – 52.

155 Строганов, В. И. Инструменты организации индивидуального отзыва автомобилей из эксплуатации в решении проблемы надёжности / В. И. Строганов, В. Н. Козловский // Техника машиностроения. – Москва, Виразж-Центр. – №1. – 2013. – С. 30 – 35.

156 Строганов, В.И. Концепции развития электромобилей // В. И. Строганов, В. Н. Козловский, М.А. Пьянов // Грузовик. – 2014. – №5. – С.7 – 17.

157 Строганов, В.И. Проблемы и тенденции проектно-технологического развития электромобилей // В. И. Строганов, В.Н. Козловский, В.И. Воловач // Автомобильная промышленность. – 2014. – №4. – С.1 – 6.

158 Строганов, В. И. Инновационные методы исследования качества и надёжности электромобилей и автомобилей с гибридной силовой установкой : монография / В. И. Строганов, В. Н. Козловский. – М. : ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», – 2012. – 228 с.

159 Строганов, В. И. Аналитические исследования качества автомобилей в эксплуатации: монография / В. И. Строганов, В. Н. Козловский. – «Palmarium

Academic Publishing», AV Akademikerverland «GmbH&Co.», Deutschland, 2013. – 140 с.

160 Строганов, В.И. Ключевые аспекты изменения в автомобильной промышленности в контексте развития электрических технологий // В. И. Строганов, В.Н. Козловский, В.Е. Ютт // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – №1. – С.2 – 6.

161 Строганов, В.И. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 1. // В. И. Строганов, В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – №1. – С.40 – 49.

162 Строганов, В.И. Анализ основных проектных решений при разработке электромобилей // В. И. Строганов, В.Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – №2. – С.10 – 15.

163 Строганов, В.И. Аналитическое моделирование тяговой системы электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой // В.И. Строганов, В.Н. Козловский, А.Г. Сорокин А.Г., Л.Н. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. - №7. – С. 107 – 113.

164 Строганов, В.И. Математическое моделирование основных процессов электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой // В.И. Строганов, В.Н. Козловский, А.Г. Сорокин А.Г., Л.Н. Мифтахова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. - №7. – С. 129 – 133.

165 Строганов, В. И. Моделирование систем электромобилей и автомобилей с комбинированной силовой установкой в процессах проектирования и производства : монография / В. И. Строганов, В. Н. Козловский. – М.: ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», – 2014. – 304 с.

166 Строганов, В.И. Комплекс электронных систем управления движением легкового автомобиля с комбинированной силовой установкой. Часть 2. // В. И. Строганов, В.Н. Козловский, В.В. Дебелов, М.А. Пьянов // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2014. – №2. – С.19 – 29.

- 167 Строганов, В.И. Ресурсное и инфраструктурное обеспечение процессов жизненного цикла электромобилей // В. И. Строганов, В.Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – №3. – С.6 – 9.
- 168 Строганов, В. И. Массогабаритный анализ гибридных энергоустановок с тепловыми двигателями / В. И. Строганов // М. : МГТУ «МАМИ». – 2002. – С. 135 – 138.
- 169 Субетто, А. И. Качество как символ синтетического мышления и управления развитием общества / А. И. Субетто // Стандарты и качество. – 1993. – №9. – С. 24 – 28.
- 170 Тавер, Е. И. Модель качества как объект регулирования / Е.И. Тавер // Стандарты и качество. – 1993. – №6. – С.18 – 23.
- 171 Тарушкина, Л. Т. Статистическая оценка параметров управляемых систем с помощью ЦВМ / Л. Т. Тарушкина. – Ленинград, 1973. – 176 с.
- 172 Татарских, Б. Я. Экономические и организационные проблемы развития машиностроительного комплекса России / Б. Я. Татарских. – Самара, 1998.
- 173 Теория и расчет тягового привода электромобилей / под ред. И. С. Ефремова. – М. : Высш. школа, 1984. – 383 с.
- 174 Технический отчет по проекту «Развитие системы качества» ОАО «АВТОВАЗ». Выбор методов исследования конкурентоспособности автомобилей. – Самара : ЗАО «Академический инжиниринговый центр», 2005. – 70 с.
- 175 Трещев, И. И. Методы исследования машин переменного тока / И. И. Трещев. – Ленинград, 1969. – 235 с.
- 176 Фасхиев, Х. А. Проблемы качества в автомобилестроении / Х. А. Фасхиев, О. А. Ситникова // Машиностроитель. – 2000. – №1. – С. 34 – 38.
- 177 Федюкин, В. К. Методы оценки и управления качеством промышленной продукции : учебник / В. К. Федюкин, В. Д. Дурнев, В. Г. Лебедев. – М. : Информационно-изд. дом «Филинь», Релант, 2001. – 328 с.
- 178 Фейгенбаум, А. Контроль качества продукции : сокр. пер. с англ. / А. Фейгенбаум, под ред. А. В. Гличева. – М., 1986. – 471 с.

- 179 Ферапонтов, А. П. Новый подход к оценке качества продукции / А. П. Ферапонтов // Стандарты и качество. – 1993. – №10. – С. 55 – 59.
- 180 Фесенко, М. Н. Системы электроснабжения с повышенным номинальным напряжением / М. Н. Фесенко, До Ван Зунг // Автотракторное электрооборудование. – 2002. – №1. – С. 12 – 18.
- 181 Хортов, В. П. Бортовая электросеть напряжением 65 В / В. П. Хортов // Автомобильная промышленность. – 1994. – №3. – С.10 – 15.
- 182 Черкесов, Г. Н. Надежность технических систем / Г. Н. Черкесов. – М., 1974. – 296 с.
- 183 Шалдыкин, В. П. Качество – главное условие возрождения отечественного автомобилестроения / В. П. Шалдыкин // Автомобильная промышленность. – 1997. – №9. – С. 1., №10. – С. 1., №12. – С. 1 – 5.
- 184 Шалдыкин, В. П. Качество – стратегия управления предприятием / В. П. Шалдыкин // Автомобильная промышленность. – 1998. – №10. – С.1 – 6.
- 185 Шевченко, А. Ф. Стартер-генераторное устройство для легковых автомобилей класса ВАЗ-2110 / А. Ф. Шевченко, А. С. Медведко, Ю. Г. Бухгольц и др // Электротехника. – 2003, – №9. – С. 15 – 19.
- 186 Шиндовский, Э. Статистические методы управления качеством / Э. Шиндовский, О. Шюрц. – М., 1976. – 600 с.
- 187 Шор, Л. Б. Таблицы для анализа и контроля надежности / Л. Б. Шор, Ф. И. Кузьмин. – М., 1968. – 288 с.
- 188 Шор, Я. Б. Методы комплексной оценки качества продукции / Я. Б. Шор. – М., 1971. – 56 с.
- 189 Шторм, Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества / Р. Шторм. – М., 1970. – 367 с.
- 190 Электромобиль: Техника и экономика / В. А. Щетина, Ю. Я. Морговский, Б. И. Центр, В. А. Богомазов; под общ. ред. В. А. Щетины. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 253 с.

- 191 Юнак, Г. Л. Методические материалы. Планирование и применение FMEA конструкции, технологии и оборудования на ОАО «АВТОВАЗ» / Г. Л. Юнак, В. Е. Годлевский, Г. В. Иванов. – Самара, 2005. – 176 с.
- 192 Ютт, В. Е. Электрооборудование автомобилей / В. Е. Ютт. – М., 1995. – 304 с.
- 193 «Vom Problemfall zur Goldader» // Automobil Industrie. – 1998. – №3.
- 194 АК&МК : Переговоры о приобретении альянсом Renault-Nissan контрольного пакета акций АВТОВАЗа – вопрос нескольких месяцев [Электронный ресурс] / К. Гон. – 14.09.2011. URL : http://www.akm.ru/rus/news/2011/september/14/ns_3703358.htm (дата обращения: 15.04.2014).
- 195 AUTO.KM.RU : Продажи первого в России электромобиля стартуют в мае текущего года [Электронный ресурс]. – 13.04.2011. – URL : <http://www.km.ru/forum/avto/content/prodazhi-pervogo-v-rossii-elektromobilya-startuyut-v-mae-tekushchego-goda> (дата обращения: 15.04.2014).
- 196 AUTO.MAIL.RU : Гибриды станут подзаряжаемыми [Электронный ресурс]. – 10.05.2011. – URL : http://auto.mail.ru/article/34241-gibridy_stanut_podzaryazhaemymi/ (дата обращения: 15.04.2014).
- 197 AUTO.MAIL.RU : Первый в мире электрический спорткар снимают с производства [Электронный ресурс]. – 21.12.2011. – URL : http://auto.mail.ru/article/36009-pervyi_v_mire_elektricheskii_sportkar_snimayut_s_proizvodstva/ (дата обращения: 15.04.2014).
- 198 AUTONEWS : Nissan разработал бюджетную электрическую АЗС [Электронный ресурс]. – 15.09.2011. – URL : http://www.autonews.ru/automarket_news/news/1700148/ (дата обращения: 15.04.2014).
- 199 AUTONEWS : SEAT представила электрокар и гибрид [Электронный ресурс]. – 10.11.2011. – URL : http://www.autonews.ru/automarket_news/news/1707830/ (дата обращения: 15.04.2014).

200 AUTONEWS : Автосалон в Женеве – 2011: все премьеры [Электронный ресурс]. – 02.03.2011. URL : http://www.autonews.ru/first_look/news/1649260/ (дата обращения: 15.04.2014).

201 AUTONEWS : General Motors поделится с Китаем электромобильными ноу-хау [Электронный ресурс]. – 10.10.2011. – . URL : http://www.autonews.ru/automarket_news/news/1703477/ (дата обращения: 15.04.2014).

202 AUTONEWS : PwC: Внедрить электромобили в России будет сложно [Электронный ресурс]. – 31.01.2011. URL : http://www.autonews.ru/automarket_news/news/1683358/ (дата обращения: 15.04.2014).

203 Integrierter Starte-Generator für das 42-V-Bordnetz // ATZ: Automobiltechn. Zeitungshifte. – 2002. – №7-8. z. 668-674.

204 Stephan, Jennifer. Real-Time Estimation of the Parameters and Fluxes of Induction Motors / Jennifer Stephan, Marc Bodson, John Chiasson // IEEE Trans. Ind. Appl. – vol. 30. – №3. – May/June 1994. – pp. 746-759.

205 LADAONLINE : Тенденция уходящего года: готовимся к нашествию электромобилей? [Электронный ресурс]. – 26.12.2011. URL : <http://ladaonline.ru/news/68952/> (дата обращения: 15.04.2014).

206 Langkabel, G. ISAD vor dem Durchbruch “Wir haben die Technologie, die man in Serie bringen kann” / G. Langkabel // Automotive Engineering Partners. – 1998. – №2.

207 MOTORPAGE.RU : Интервью с Такаши Яманучи, президентом, главным управляющим Mazda [Электронный ресурс]. – 11.07.2011. URL : http://motorpage.sitewin.ru/Mazda/interview/yearvse_goda/ (дата обращения: 25.06.2013).

208 W. Peukert, Über die Abhängigkeit der Kapazität von der Entladestromstärke bei Bleiakkumulatoren, Elektrotechnische Zeitschrift 20 (1897)

209 SLON.RU : Легкового производства в России у нас не будет [Электронный ресурс]. – 04.03.2011. URL : <http://slon.ru/economics/>

[legkovogo_proizvodstva_v_rossii_u_nas_ne_budet-540370.xhtml](#) (дата обращения: 15.04.2014).

210 The electric vehicles report: 2011 edition.

211 Vom Problemfall zur Goldader // Automobil Industrie. – 1998. – №3. – С. 76.

212 ZR.RU : IBM увеличит запас хода электромобилей до 800 км [Электронный ресурс]. – 13.01.2012. URL : http://www.zr.ru/content/news/398809-ibm_uvelichit_zapas_khoda_elektromobilej_do_800_km/ (дата обращения: 15.04.2014).

ПРИЛОЖЕНИЯ



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

ВИЦЕ-ПРЕЗИДЕНТ
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РАЗВИТИЮ

ОГРН 1026301983113
ИНН 6320002223

Заставная, 2, Тольятти
Самарская область, 445043
Телефон (8482) 73-89-87
Телетайп 290 222 ТОПАЗ
Телекс 214 147 TLT RU
Телефакс (8482) 73-91-29

**ДИРЕКЦИЯ ПО ИССЛЕДОВАНИЯМ
И РАЗРАБОТКАМ**

№ _____
На № _____ от _____

Акт

о внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени доктора технических наук В.И. Строганова «Повышение эксплуатационных характеристик электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой»

Результаты диссертационной работы в виде математических и имитационных моделей работы системы тягового электропривода применены при оценке эксплуатационных характеристик разрабатываемых автомобилей с комбинированной энергетической установкой на базе семейства LADA «Granta».

Руководитель проекта автомобилей
класса «Б» с комбинированной
энергетической установкой



К.В. Демин



Адрес местонахождения: 445043, Самарская обл., г. Тольятти, ул. Коммунальная, 39, оф. 624
Юридический адрес: 445031, Самарская обл., г. Тольятти, б-р Татищева, 9-69
Почтовый адрес: 445043, Самарская обл., г. Тольятти-43, а/я 5676
Телефон/факс: (8482) 75-82-79, e-mail: busconsult@bk.ru
www.buscons.com

ИНН 6321117202, КПП 632101001, р/с 40702810300280004622 в ОАО Банк АББ,
БИК 043678700, к/с 30101810400000000700,
ОКВЭД 74.14, ОКПО 59662972, ОГРН 1036300992848

Акт о внедрении результатов научной деятельности

Компания Бизнес-Консалт является одним из лидеров консалтинговых и проектных инжиниринговых работ в машиностроительной отрасли России. Наша организация осуществляет как подготовку специалистов, так и ведение бизнес проектов в области инжиниринга на таких предприятиях машиностроения как ОАО «АВТОВАЗ», ОАО «КАМАЗ», ЗАО «Джи ЭМ – АВТОВАЗ», «РОСТСЕЛЬМАШ» и т.д.

Настоящим актом внедрения научных результатов в практику компаний машиностроительной отрасли России, подтверждаем, что полученные в ходе научной работы Строганова Владимира Ивановича результаты, внедрены в практическую деятельность ООО «Бизнес-Консалт». Разработанные автором, инструменты анализа эффективности мероприятий направленных на улучшение качества и надежности продукции, используются при выполнении проектных работ на предприятиях автомобилестроения. Инструмент прогнозирования затрат на гарантийное обслуживание новых автомобилей используется в качестве консультационного раздела деятельности Бизнес-Консалт и прошел апробацию в службах качества ряда машиностроительных предприятий.

Директор ООО БИЗНЕС-КОНСАЛТ



Е.Ю. Яблоков



ООО «ШТАТ», 445020, РФ, г. Тольятти, ул. Советская, 73а, тел./факс 8(8482) 48-34-04,
ИНН 6323099132, КПП 632401001, ОГРН 1076320013329, р/счет 40702810001000018809
филиал "Поволжский" ЗАО "ГЛОБЭКСБАНК", г. Тольятти, БИК 043678713,
к/счет 30101810400000000713 в РКЦ г.Тольятти

Компанией ООО «Штат», являющейся официальным поставщиком электронных компонентов ЗАО «Джи-ЭМ – АВТОВАЗ», подтверждается, что разработанные авторским коллективом в составе Строганова Владимира Ивановича, Козловского Владимира Николаевича, Дебелова Владимира Валентиновича имитационные модели электронных систем управления автомобилем: VVT, Start-Stop, система управления скоростью движения легкового автомобиля используются в практике работы компании. Разработанные имитационные модули внедрены в процессы проектирования соответствующих электронных систем легковых автомобилей.

Руководитель



Ю.В. Офицерова



115230, Россия, г. Москва, Варшавское шоссе, д.47, к. 4

Телефон: (495) 775 0748, факс: (495) 775 0749

E-mail: npp@itelma.ru ИНН 7724685256

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы на соискание
ученой степени доктора технических наук В.И Строганова
«Повышение эксплуатационных характеристик электромобилей с комбинирован-
ной энергоустановкой»

Настоящим актом удостоверяется, что полученные результаты научно-технического исследования Строганова Владимира Ивановича внедрены в практику производственной деятельности ООО «НПП «ИТЭЛМА». В частности, полученные автором математические и имитационные модели работы систем тягового электропривода, в различных режимах, реализованы в виде алгоритмов и программных кодов с использованием их для проектирования соответствующих систем управления перспективного автомобильного транспорта, а именно электромобилей и автомобилей с комбинированными энергоустановками. Математические модели тяговых аккумуляторных батарей используются для разработки оптимизированной электронной системы управления процессами заряда / разряда тяговых аккумуляторов электромобилей.

Главный конструктор



Зиновьев И.В.



Консалтинговый центр
«КАЧЕСТВО = XXI ВЕК»

445054, РФ, Самарская обл., г. Тольятти,
ул. Баныкина д.62-96, тел./факс (8482) 27-03-18

E-mail: info@quality21-volga.ru,

сайт: <http://quality21-volga.ru/>

ИНН/КПП 6323091790/632401001

№ _____

На № _____ от _____

Акт о внедрении результатов научной деятельности

Настоящим актом внедрения, подтверждаем, что полученные в ходе научной работы Строганова Владимира Ивановича результаты, внедрены в практическую деятельность ООО Консалтинговый центр «Качество=XXI век». Разработанные автором, инструменты измерения качества и надежности комплекса электрооборудования электромобилей и автомобилей с комбинированной энергоустановкой используются при реализации внедренческих проектов на предприятиях автомобильного кластера России.

Директор,
к.т.н., доцент

Панюков Д. И.

